UNTERSUCHUNGEN AN GEOLOGISCHEN, FERNERKUNDLICHEN UND GEOPHYSIKALISCHEN DATEN UND DEREN INTERPRETATIONSOPTIMIERTEN DARSTELLUNGEN FÜR DIE EXPLORATION IN DER SW-IBERISCHEN KIESPROVINZ

am Beispiel des Gebietes
NW Tharsis, Provincia Huelva

Peter Volk

UNTERSUCHUNGEN AN GEOLOGISCHEN, FERNERKUNDLICHEN UND GEOPHYSIKALISCHEN DATEN UND DEREN INTERPRETATIONSOPTIMIERTEN DARSTELLUNGEN FÜR DIE EXPLORATION IN DER SW-IBERISCHEN KIESPROVINZ

am Beispiel des Gebietes NW Tharsis, Provincia Huelva

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Geowissenschaften
an der
Ludwig - Maximilians - Universität
München

vorgelegt von
Peter Volk

---

eingereicht am 20. 12. 1985 in München

Tag der mündlichen Prüfung: 13.Juni 1986

1.Berichterstatter: Prof. Dr. J. Bodechtel

2.Berichterstatter: Prof. Dr. D. Klemm

Für meinen verstorbenen Vater

drucken + binden
gmbh
Schellingstraße 23
8000 München 40
☎ 089/28 44 45

INHALTSVERZEICHNIS Seite

I. EINLEITUNG 1
1. Kurzfassung / Abstract....1/2
2. Vorwort....3
3. Einführung....5
3. 1. Datenvielfalt - integrierte Auswertung in der Exploration....6
3. 1. 1. Herkömmliche Strategien....6
3. 1. 2. Neuere Ansätze....7
3. 2. Ziel der Untersuchungen....8
3. 3. Testobjekt und Testgebiet....10
3. 4. Vorhandene Daten....10
3. 5. Planung und Vorgehensweise....12

II. DAS TESTGEBIET, SEINE GEOLOGIE UND ERZBILDUNGEN 14
1. Lage und Geographie....14
2. Geologie....15
2. 1. Geologische Erkundungen und ältere Arbeiten....16
2. 2. Stratigraphie und Petrographie....18
2. 2. 1. Stratigraphische Profile und geologische Karte.18
2. 2. 2. Serien des Testgebiets....19
2. 2. 2. 1. Tonschiefer - Quarzit-Komplex (TQ)....19
2. 2. 2. 2. Vulkanosedimentärer Komplex (VK)....20
2. 2. 2. 3. Tonschiefer - Grauwacken Komplex (TG)....28
2. 2. 3. Der variszische Sedimentationsraum....29
2. 2. 4. Metamorphose und jüngere geol. Geschichte....30
2. 3. Tektonik....32
2. 3. 1. Tektonischer Rahmen des Testgebiets....32
2. 3. 2. Variszische Strukturbildungen....33
2. 3. 2. 1. Problem Schieferung - Schichtung....34
2. 3. 2. 2. Bruchlose Verformungen....35
2. 3. 2. 3. Bruchhafte Verformungen....38
2. 3. 3. Hinweise auf nachvariszische Strukturen....41
2. 3. 4. Zusammenfassung der Tektonik....41
2. 4. Erzbildungen....43
2. 4. 1. Gegenwärtige Bergbauaktivitäten....43
2. 4. 2. Kieserze....45
2. 4. 2. 1. Stoffbestand und Struktur der Erzkörper....45
2. 4. 2. 2. Nebengestein....50

2. 4. 3. Andere Vererzungen.....52
2. 4. 4. Betrachtungen zur Genese der Erze.....52
2. 4. 5. Aktuelle Exploration.....56
2. 5. Geologische Ansätze für die Exploration auf Kieserze.....57

III. INFORMATIONSGEHALT DER FERNERKUNDUNGS- UND GEOPHYSIKALISCHEN DATENSÄTZE 59
1. Problematik der Auswertung unterschiedlichster DS....59
2. Datensätze und ihr Bezug zu Kieserzen im Testgebiet..60
2. 1. Fernerkundungsdaten.....60
2. 1. 1. Landsat MSS.....62
2. 1. 2. Landsat TM.....67
2. 1. 3. Luftbild.....78
2. 2. Geophysikalische Daten.....81
2. 2. 1. Flugmessungen.....81
2. 2. 1. 1. Elektromagnetik.....82
2. 2. 1. 2. Magnetik.....85
2. 2. 1. 3. Gamma - Spektrometrie.....88
2. 2. 2. Bodenmessungen.....92
2. 2. 2. 1. Gravimetrie.....93
3. Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften und Informationsgehalte.....95

IV. KOMBINATIONEN VON DATENSÄTZEN ALS INTERPRETATIONSOPTIMIERTE DARSTELLUNGEN 97
1. Konzeption interpretationsoptimierter Darstellungen..97
1. 1. Grundüberlegung: Rasterbilder statt Karten.....97
1. 2. Optisch trennbare Informationsebenen.....99
1. 2. 1. Kombination von DS via Synthetischem Stereo....100
1. 2. 2. Kombination von DS via arithmetischer Verknüpfungen hoch- und niederfrequenter Bilddaten....101
1. 2. 3. Kombination von DS via Intensität, Farbfrequenz, Sättigung.....102
1. 3. Einschränkungen und Grenzen.....105
1. 3. 1. Einschränk. bei der Erzeugung von Rasterdaten..105
1. 3. 2. Einschränk. bei der Kombination mehrerer DS....107
1. 4. Konzept interpretationsoptimierter DS - Kombinationen für das Untersuchungsgebiet.....107
2. Verarbeitung von DS mit Methoden eines

Geographischen Informations Systems (GIS) und der digitalen Bildverarbeitung (BV).....112
2. 1. Vorbereitung der Kartendaten.....113
2. 2. Umwandlung in digitale Rasterdaten.....113
2. 3. Luftbilddigitalisierung.....114
2. 4. Verarbeitung der digitalen Rasterdaten mit BV.....114
2. 5. Abspielung und Photoprodukt.....116
2. 6. Möglichkeiten und Grenzen.....117
3. Technische Qualität der erzeugten DS-Kombinationen...117

V. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN 118
1. Ergebnisse aus den geologischen Daten.....118
1. 1. Übersichtsexploration.....118
1. 2. Beurteilung von Detailgebieten nach feldgeologischen Kriterien.....120
2. Ergebnisse aus der Betrachtung der DS-Kombinationen..121
2. 1. Auswertung.....122
2. 2. Zusammenfassung der Interpretationen.....137

VI. DISKUSSION 140
1. Ergebnisse und Schlußfolgerungen für das Testgebiet..140
1. 1. Übersichtsexploration.....140
1. 2. Detailexploration.....142
1. 3. Vorschläge für weitere detaillierte Exploration auf Kieserze im Testgebiet.....142
2. Überlegungen zu einer effizienten Übersichtsexploration.....143
3. Erfahrungen bei den Untersuchungen an den DS.....147
4. Bedeutung von DS - Kombinationen.....148
4. 1. Eignung von DS für Kombinationen.....151
4. 2. Eignung von Kombinationsverfahren.....152
4. 3. Generelle Einsatzmöglichkeiten und Ausblick.....153

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

LITERATUR UND KARTEN

ANHANG

1. Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt das Problem einer effektiven Auswertung verschiedener geowissenschaftlicher Flächendaten für Zwecke der "Übersichtsexploration", der regionalen Phase eines größeren Explorationsprogrammes. Das Zielobjekt sind polymetallische Kieserzvorkommen vom Rio Tinto - Typ in einem Untersuchungsgebiet im Zentrum des südwest-iberischen Kiesgürtels.
Auf der Grundlage lithologischer, tektonischer und erzgenetischer Betrachtungen werden Kriterien für eine Einschätzung des Informationsgehaltes von fernerkundlichen und geophysikalischen Daten entwickelt. Dabei konnte der Wert von Messverfahren, wie sie nicht "klassischerweise" für die Exploration auf Kieserze eingesetzt werden, demonstriert werden. Eine Vorauswahl der aussagekräftigsten Datensätze werden mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung zu sieben interpretationsoptimierten Darstellungen kombiniert. Diese Kombinationen werden nach Kriterien einer thematischen Aussage, möglicher Kombinationsverfahren und der Eignung der Datensätze zu synoptischen "Produkten" zusammengestellt. Eine Interpretation, die ein erarbeitetes geologisches Konzept berücksichtigt, erlaubt in einigen Fällen die deutliche Verbesserung der thematischen Interpretation, verglichen mit einer Einzelauswertung der vorhandenen Daten. Synoptische Betrachtung, Korrekturen einzelner Datensätze und eine gute Orientierung anomaler Bereiche erleichtern eine Selektion von höffigen Gebieten für eine detaillierte Bearbeitung. Es sind spezifische Aussagen für "direkte" Hinweise auf eine Erzfazies und "indirekte" auf höffige vulkanosedimentäre Serien auch unter flacher steriler Bedeckung möglich. Durch die Einbeziehung mehrerer unabhängiger Kriterien wird die Aussagesicherheit gesteigert. Der Vergleich mit bekannten Kieserzvorkommen und anderen geologischen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung.
Über Zwecke einer großflächigen Exploration auf mineralische Rohstoffe hinaus könnten alle Anwendungsbereiche vom Konzept interpretationsoptimierter Datensatz - Kombinationen profitieren, die auf die Beherrschung großer Datenmengen bei mehreren flächenhaften Datensätzen angewiesen sind.

abstract

Effective use of different, two dimensional geoscientific datasets for the integration in the reconnaissance phase of a major exploration project is the main topic of these investigations. The exploration target is polymetallic sulphide ore (Rio Tinto type) within a test area in the centre of the southwest-Iberian Pyrite Belt.
It is an essential step, to elaborate and discuss first the geology of the test area, the thematic value of each sensing method and their results in relation to the target extensively. Based on lithological, tectonical and ore genetical considerations, criteria will be developed, allowing the evaluation of the specific information of remote sensing and geophysical data. Despite a missing direct interaction between ore and sensor, it can be demonstrated that some methods yield subtle informations related to ore facies. The most interesting data sets have been integrated to seven "interpretation-optimized" products by digital image processing algorithms. These combinations are determined by the thematic value of the data sets involved, the method of combination and at last, the "technical aptitude" of data for an integration. Based on geological concepts, most products figure out a significant improvement in thematic interpretation compared with an individual treatment. Synopsis, thematic corrections of some data sets and the localization of anomalies support the selection of high potential areas for detailed analysis. The conclusions make possible a differentiation into "direct" and "non-direct" hints to ore (ore facies and volcanogenic strata under sterile cover, respectively). Comparison with known ore facies and other geological data shows good correlation.

Not only exploration programmes, but all fields of applications could share in a similar concept of "interpretation-optimized" data products, that are bound to interpretation of several, two-dimensional data sets.

2. Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1983-1985 an der Arbeitsgruppe Geowissenschaftliche Fernerkundung (Leitung: Prof. Dr. J. Bodechtel) der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwigs-Maximilians-Universität München.
Sie berücksichtigt die wesentlichen Ergebnisse meiner Untersuchungen, die im Rahmen des BMFT-Forschungsvorhabens 01QS0730 "Anwendung eines modifizierten Geographischen Informationssystems zur lagerstättenkundlichen und hydrogeologischen Nutzung von Fernerkundungsaufnahmen in Zusammenhang mit thematischen Karten" durchgeführt wurden. Die Leitung des Gesamtprojekts lag bei Dr. R. Haydn. Die großzügige Förderung durch das BMFT war die wesentliche Voraussetzung für die Durchführung der Geländearbeiten und vor allem die Nutzung moderner Verfahren der Aufbereitung und Verarbeitung flächenhafter geowissenschaftlicher Informationen.

Die thematische Anregung kam von zwei Seiten; sie gab mir die Möglichkeit, methodische Überlegungen mit einer konkreten geowissenschaftlichen Fragestellung zu verbinden.

Herr Dr. R. Haydn lieferte mit seinen Forschungen zu Interpretationsoptimierten Darstellungen von verschiedenen Fernerkundungsdaten eine wichtige Grundlage für diese Arbeit. In vielen fruchtbaren Diskussionen entstand schließlich der Plan, die Möglichkeiten digitaler Bildverarbeitung und ihrer Darstellung auf eine eng umrissenen Fallstudie im Bereich der Exploration auf mineralische Rohstoffe anzuwenden. Herr Dr. J. Weisser von der Metallgesellschaft AG., Abt. Bergbau, gab mir wesentliche Impulse speziell geophysikalische Flugdaten in die Untersuchungen miteinzubeziehen. Die Herren Dr. Greinwald, Dr. K.P. Sengpiel und besonders Dr. R. Scholz von der BGR halfen großzügig bei der Auswahl und Prozessierung der verwendeten geophysikalischen Daten. Für die Genehmigung und Bereitstellung sei hier Herrn Prof. Dr. Dürbaum gedankt. Unterstützung speziell bei der Behandlung der Magnetik erhielt ich von Herrn Dr. Pohl vom Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der LMU München.

ie Anwendung und Ausrichtung der Fragestellung auf die explorationsgeologische Praxis war unmöglich ohne Hilfestellung der Industrie durchzuführen. Herr Dr. G. K. Strauss, Direktor der Compania de Azufre y Cobre de Tharsis S.A., gewährte mir hier den so wichtigen Kontakt. Ihm und K. Gray seien für ihre Geduld während zahlreicher Gespräche, die überaus großzügige Versorgung mit Daten und Material, die Erlaubnis zu Besuch und Messungen in den Minen der Gesellschaft und für die logistische Hilfe ein besonderer Dank ausgesprochen. Einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Kiesvererzungen und ihrer Geologie verdanke ich Herrn R. D. Goethe, senior geologist der Chevron Resources Inc..

Mein Betreuer, Herrn Prof. Dr. J. Bodechtel, unterstützte diese Arbeit durch sein kritisches Interesse und die Möglichkeit die Einrichtungen der Arbeitsgruppe Geowissenschaftliche Fernerkundung am Institut für allgemeine und angewandte Geologie zu benutzen. Für letzteres sei auch Herrn Prof. Dr. K. Weber-Dieffenbach gedankt. Wichtige Anregungen und Unterstützung erhielt ich von Herrn Prof. Dr. D. Klemm. Herr Dr. R. Haydn begleitete die Arbeiten immer mit seiner großen Erfahrung in der digitalen Bildverarbeitung und Herr Dr. J. Henkel half beständig und mit großer Geduld bei allen Problemen der Datenverarbeitung. Viele anderen Kollegen des geologischen Instituts, namentlich Dipl. geol. Matthias Baron, Dr. F. Jaskolla und viele andere, trugen durch Gespräche und tatkräftige Unterstützung zu dieser Arbeit bei. Prof. Dr. B.N. Koopmans, ITC Delft, stellte unbürokratisch Material der SAR 580 Kampagne und tektonische Untersuchungen über das Testgebiet zur Verfügung.
Meinem Freund und Kollegen Günther Kohlhammer verdanke ich eine Zusammenarbeit während des Forschungsvorhabens und darüber hinaus wie man sie sich besser nicht vorstellen könnte. Kolbeinn Arnasson schließlich war für die Arbeit und mich eine wichtige Stütze durch seine kritischen Gedanken und seinen Humor. Allen meinen Freunden, den Eltern und meiner Frau Barbara bin ich für ihre Geduld und ihre mannigfache Hilfestellung ganz herzlichen Dank schuldig.

3. Einführung

Ausgangspunkt und zugleich Motivation für die Auseinandersetzung mit diesem Thema waren die vielfältigen Möglichkeiten der verschiedenen, für die Exploration nutzbaren Messverfahren.
Paradoxerweise sorgt aber genau dieser Umstand in der Praxis auch für ein großes Problem: Wie können die gerade bei fernerkundlichen und geophysikalischen Methoden anfallenden riesigen Datenmengen für den Geologen sinnvoll aufbereitet und selektiert werden? Wie berücksichtigt man den entscheidenden Inhalt ohne gleichfalls nützliche Beiinformationen völlig zu vernachlässigen? Hier baut diese Arbeit auf grundsätzlichen Überlegungen zur Verbesserung der Interpretationsfähigkeit bei gleichzeitiger Betrachtung mehrerer unabhängiger Informationsebenen auf. J. STINI und H. CLOOS für die Geologie und A. HETTNER in der Geographie sind hier Wegbereiter.
Automatische Verfahren, wie digitale Klassifikationsmethoden, berücksichtigen geowissenschaftliche Erfahrungen und Kenntnisse nur in schematisierter Form. Sie liefern daher bereits interpretierte und keine in ihrer Interpretierbarkeit gesteigerten Daten, die erst mit der fachlichen Interpretation ihren spezifischen Wert erhalten. Eine solche Form der Datenaufbereitung scheint mir aber für eine umfassende Einbeziehung der persönlichen Erfahrung des Interpreten die geeignetere zu sein. Grundlage bei allen Überlegungen zur Verbesserung der Interpretationsfähigkeit muß ein thematischer Ansatz bei der Aufbereitung eines Datensatzes sein. Als thematisch seien hier alle Überlegungen definiert, die sich auf die Anwendung in der Exploration auf Kieserze beziehen. Unter Datensätzen (DS) wird im Folgenden die Summe aller Flächendaten eines Mess- bzw. Aufzeichnungsverfahrens oder daraus abgeleiteter Informationen verstanden.
Speziell die Übersichtsexploration, also die Exploration zur Festlegung von Schwerpunktsgebieten für detailliertere Untersuchungen ist der wichtigste Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Es soll im Folgenden beschrieben werden, wie neue Ansätze das Datenmanagement besonders in der Anfangsphase eines Explorationsvorhabens unterstützen könnten, welche Ziele verfolgt werden und schließlich welches Testobjekt und -gebiet für die Untersuchungen geeignet erschien.

. . Datenvielfalt - integrierte Auswertung in der Exploration

Seit den fünfziger Jahren werden in der Lagerstättenexploration neben den schon klassischen geophysikalischen Bodenmessungen zunehmend auch flächendeckende Flugzeug- und Helikoptergetragene Verfahren eingesetzt. Diese "blanket coverages" liefern, vor allem wenn mehrere Messysteme installiert sind, umfangreiches Datenmaterial. Zusätzlich sind mit Erdbeobachtungssatelliten der zweiten Generation heute Daten verfügbar, deren räumliche und spektrale Auflösungseigenschaften dem Geowissenschaftler differenzierte Analysen von Oberflächen und Strukturen ermöglichen. Großmasstäbliche geologische Kartierungen, geochemische Untersuchungen und andere Verfahren tragen auch zu einer "Datenflut" bei, die zur Bearbeitung eines bestimmten Explorationsziels beherrscht werden muß. Strukturelle, lithologische und vielleicht auch genetische Zusammenhänge werden so immer schwieriger synoptisch erfassbar und interpretierbar.

3.1.1. Herkömmliche Strategien

Der Begriff Exploration im hier gebrauchten Sinn umfasst alle Untersuchungen und Tätigkeiten, die darauf abzielen, Vorkommen von mineralischen Rohstoffen in einem vorgegebenen Gebiet zu suchen, lokalisieren und ihre Vorräte, Verteilung und Konzentration festzustellen. Die ersten Schritte des Aufsuchens größerer Anreicherungen an nutzbaren mineralischen Rohstoffen beginnt bei großflächigen Programmen mit einer "Übersichtsexploration", im deutschen Sprachraum als "Prospektion" von den kleinflächigen Arbeiten an festgestellten Erzvorkommen unterschieden (PETRASCHECK&POHL 1982, GOCHT 1983). FORTESCUE (1965) gibt eine Übersicht über einen idealisierten, vollständigen Explorationsplan:

Abschnitt I : Regionaler Plan
Abschnitt II : Aufstellung des Untersuchungsplans
Abschnitt III: Detaillierter Projektplan
Abschnitt IV : Ergebnisse, Bericht

Der detaillierte Projektplan beginnt mit großräumigen Aufnahmen in geeigneten Verfahren. Auf dieser Grundlage werden interessante Gebiete (Anomalien) selektiert, hier setzen nun schwerpunktsmäßig lokale Untersuchungen in großen Masstäben an. Deren Ergebnisse sollen eine Ausscheidung in bedeutende und unbedeutende Anomalien ermöglichen. Die Ersteren sind schließlich Ziel für Methoden der

Endphase, vor allem Bohrungen, Schürfe und bergbauliche Explorationsmaßnahmen. Zum Schluß wird eine Einschätzung in wirtschaftliche und unwirtschaftliche Vorkommen vorgenommen.

Der ganze Vorgang stellt also einen vom Groben ins Feinere gehenden Auswahlprozess dar. Gerade der Schritt von der regionalen ("Übersichtsexploration") zur lokalen Bearbeitung ("Detailexploration") ist dabei ein entscheidender. Hier muß je nach Vorhaben die Reduktion auf eine kleine Anzahl möglichst vielversprechender Anomalien stattfinden. Alle lokalen Maßnahmen, vor allem die umfangreichen Arbeiten am Boden werden durch ihre hohe Kosten (Personalintensiv) zu einem stark limitierenden Faktor für ein solches Programm.
Explorationsgeologen versuchen daher, aus möglichst vielen Datenquellen ihren Entschluß für den nächsten Schritt abzuschätzen und abzusichern. Flächenhafte Daten, hier vor allem geophysikalische und fernerkundliche, werden im Allgemeinen in Form von Karten bzw. Bildern verwendet. Liegen mehrere, aus ihrer Thematik heraus interessante Informationsebenen in verschiedener Darstellungsform vor, steht der Bearbeiter vor großen Schwierigkeiten hier einen synoptischen Blick zu erhalten, ohne dabei einzelne Informationen zu verlieren.

3.1.2. Neuere Ansätze

Etwa seit 10 Jahren versucht man synoptische Produkte zweier und mehrerer DS mit digitalen Methoden zu erzeugen und in der Praxis einzusetzen. Ein naheliegender Weg ist die Übertragung von DS als Isoliniendarstellungen auf eine bildhafte Grundlage (bevorzugt Luftbildmosaike).
Um wichtige Eigenschaften mehrerer DS zugleich sichtbar zu machen, wurden Geographische Informations Systeme (GIS) als Datenhaltungs- und Datenmanagementsysteme verwendet. Das Ergebnis ist dabei eine Darstellung hochkorrelierender, für das Explorationsziel signifikanter Eigenschaften, allerdings nur unter Annahme wesentlicher Vereinfachungen (TRAUTWEIN et al. 1982, BOLIVAR et al. 1983). Eine solche Vorgehensweise berücksichtigt nur unvollkommen die komplexen Beziehungen zwischen zu untersuchenden DS und gesuchter Erzfazies. Diese Verfahren haben einen weiteren bedeutenden Nachteil, sie lassen die Ausgangsinformation nicht zusammen mit einer synoptischen Aussage erkennen, dies ist aber

eine wichtige Voraussetzung für die Erfassung subtiler Zusammenhänge. Als Beispiele sind hier etwa Ratiotransformationen und Korrelationsanalysen zu nennen. Gerade hier sollte die fachliche Erfahrung eines Bearbeiters die Kontrolle der eigenen Interpretation an Hand der Ausgangsdaten möglich machen. Neueste Arbeiten auf diesem Gebiet experimentieren hier mit Farbkodierungen und Crautonbildern, um solche Nachteile abzubauen und eine verbesserte Interpretationsgrundlage zu schaffen (GUINNESS et al. 1983, CONRADSEN&THYRSTEDT 1985).

Aber fehlt noch ein durchgängiges Konzept, das unter Berücksichtigung aller dafür geeigneter Verfahren, ihrer Grenzen und Möglichkeiten eine Bewältigung der Schwierigkeiten verspricht. GIS - Module sind sehr hilfreich bei der Bewältigung aller Datentransformationen von verschiedenartigen, analogen Quellendaten (die zudem meist in verschiedenen Masstäben vorliegen) in digitale Rasterdaten. Bei der Weiterbehandlung bieten dann aber Methoden der digitalen Bildverarbeitung ein flexibleres Instrumentarium, um verschiedene DS für eine Auswertung zu verbessern. In diesem Sinn sollen interpretationsoptimierte Darstellungen als ein verbessertes Werkzeug in der Hand des Interpreten, hier des Explorationsgeologen verstanden werden.

3.2. Ziel der Untersuchungen

In der Exploration wird bei der Aufsuchung von Lagerstätten ein möglichst umfassendes Wissen des geologischen Umfeldes, der anzuwendenden Untersuchungsmethoden und eine objekt-orientierte Selektion wichtiger Informationen verlangt. Für die vorliegende Arbeit sollen daher an Hand einer konkreten Fragestellung allen drei wichtigen Forderungen Rechnung getragen werden.

--- Die genaue Kenntnis der Geologie und der für das Explorationsziel massgeblichen geologischen Parameter eines Gebietes ist für eine sinnvolle Informationsselektion essentiell. Eine solche Darstellung geschieht mit vorhandenen Untersuchungen und eigenen Geländeerhebungen. Diesem Punkt wurde wegen seiner besonderen Bedeutung als Grundlage aller Überlegungen auch besonderes Gewicht beigemessen.

--- Verfügbare fernerkundliche und geophysikalische DS sollen zusätzliche Informationen liefern. Dafür müssen Eigenschaften, Grenzen und der thematische Aussagegehalt diskutiert werden.

Gerade DS, die für sich behandelt mehrdeutige Informationen bezüglich des Explorationsziels beinhalten, sollen berücksichtigt werden.

--- Unter Berücksichtigung der Möglichkeiten digitaler Bildverarbeitung, der erarbeiteten geologischen Grundlagen und thematischen Aussage der DS sollen interpretationsoptimierte Darstellungen konzipiert und erzeugt werden. Sie müssen einige wichtige Anforderungen erfüllen:

* Informationen synoptisch auswertbar machen
* Informationen einzelner DS trennbar darstellen
* Zusammenhänge verdeutlichen
* Korrekturen einzelner DS erleichtern
* unzweideutig sein
* Orientierung im Gelände verbessern
* halb-quantitative Deutungen ermöglichen
* ohne großen apparativen Aufwand auswertbar sein

Ein Grundgedanke ist dabei, bildhafte `Produkte' herzustellen, die mit Kartendarstellungen in herkömmlicher Form nicht zu vergleichen sind und Vorteile bei ihrer Handhabung als Entscheidungsgrundlage erwarten lassen. Erwartet werden grundsätzlich keine neuen, eher eine verbesserte Zugänglichkeit der in den DS enthaltenen Informationen. Schließlich soll eine kritische Einschätzung und Diskussion ihrer Möglichkeiten erfolgen. Unter Heranziehung sowohl der Ergebnisse der geologischen Daten und den Aussagen der DS, als auch der optimierten Produkte werden in einer Synthese Ansätze für die Übersichtsprospektion mit den verwendeten Daten vorgelegt. Es wird versucht diese Vorschläge an Fallbeispielen aus dem Untersuchungsgebiet zu untermauern.
Die Betrachtungen zur kombinierten Darstellung verschiedener Informationsebenen könnten über den Zweck ihrer Nutzung für die Exploration hinaus noch Anregungen für eine Anwendung der Interpretationsoptimierung in anderen geowissenschaftlichen Fachrichtungen liefern.

3.3. Testobjekt und Testgebiet

Aus mehreren Gründen boten sich als Untersuchungsobjekt die SW-iberischen Kieserze an.

* oberflächennahe und tiefliegende Erzkörper
* massive, wenig disseminierte Erze
* differenzierte Forschungen zur Genese der vulkanosedimentären Kieserze
* weite räumliche und zeitliche Verbreitung dieses Lagerstättentyps
* bergwirtschaftliche Bedeutung (S,Cu,Zn,Pb,Au)

Polymetallische Kieserze mit ihrer großen Palette an nutzbaren Mineralen sind nach wie vor ein Eckpfeiler in der Rohstoffwirtschaft und für einen großen Teil aller Explorationsmassnahmen auf mineralische Substanzen ein wichtiges Ziel.
Da, wie in Kapitel II noch näher erläutert wird, in der Übersichtsexploration nicht zwischen verschiedenen Kieserzen sicher unterschieden werden kann, richten sich die Betrachtungen auf alle sulfidischen Erze mit höheren S- und Buntmetallgehalten.

Die Wahl des engeren Testgebiets wurde hauptsächlich von zwei Bedingungen bestimmt. Zum einen mußten ausreichend geologische, geophysikalische und fernerkundliche Daten in vergleichbarer Qualität vorliegen, zum anderen sollten diese Informationen auch uneingeschränkt verfügbar sein. Letzerer Punkt bekommt durch mögliche Restriktionen bei potentiell wirtschaftlich interessanten Arealen eine besondere Bedeutung. Unter diesen Aspekten fiel die Wahl auf ein Gebiet von ca. 880 km^2 Größe im mittleren Teil der sw-iberischen Kiesprovinz.

3.4. Vorhandene Daten

Dankenswerterweise wurden von Herrn Prof. Dr. Dürbaum, BGR, die Daten einer geophysikalischen Befliegung, sowie von Herrn Dr. G.K. Strauss, Compania de Azufre y Cobre Tharsis, geopysikalische Bodenmessungen, geologische Detailkarten und weitere Daten bereitgestellt. Geochemische und geologische Karten, Luftbilder waren bei Instituto Geografico Nacional (IGN) in Madrid erhältlich. Als Fernerkundungsdaten waren ausserdem eine ganze Reihe von verschiedenen Satellitendaten verfügbar.

Als potentiell interessante Daten wurden alle digitalen und analogen (Karten), flächenhaften Messungen und Informationen betrachtet, die geologische, geomorphologische und auch physikalische Phänomene beschreiben.
Geologische Karten werden unter Kapitel II, Geologie, berücksichtigt, eigneten sich wegen einer nötigen, starken Vereinfachung für eine Digitalisierung jedoch nicht für die Einbeziehung in interpretationsoptimierte Darstellungen. Ihre besondere Bedeutung liegt in der Grundlage für die Entwicklung eines Optimierungskonzeptes und als Referenz für DS - Kombinationen.
Geochemische Flächendaten waren nur für Teile des Testgebiets vorhanden, sie zeigen ausschließlich anthropogen verursachte Anomalien und erwiesen sich als unbrauchbar (IGME 1976). Auch einige Fernerkundungsdaten sowie topographische Karten schieden aus Gründen für eine Integration aus, die in Kapitel III, Datensätze, näher erläutert werden.
Für DS, die für eingehende Untersuchungen interessant erschienen, zeigt Tab.1 die Messgrössen und Bezugsquellen.

Datensätze	gemessene Größe	Herkunft
Elektromagnetik	scheinb. spez. Widerstand	BGR
Magnetik	Totalintensität	BGR
Gamma-Spektrometrie	K-Aktivität	BGR
"	Th-Aktivität	BGR
"	U-Aktivität	BGR
Gravimetrie	Bouguer-Schwere	Ca. Tharsis S.A.
Landsat-MSS	Strahlungsintensität	ESRIN
Landsat-TM	"	ESRIN
Luftbild	"	IGN

Tab.1 Übersicht über die für diese Arbeit bedeutenden DS

Die zum Teil sehr jungen Daten wurden bisher nur teilweise unter dem Aspekt ihrer Nützlichkeit für die Exploration ausgewertet. Dabei wiesen STRAUSS et al. (1977) den Wert der gravimetrischen und geoelektrischen Methoden am Beispiel der Erzkörper um Tharsis beeindruckend nach. SENGPIEL (1982) zeigte die Übereinstimmung von elektromagnetischen Anomalien aus Hubschrauber-Messflügen mit bekannten Vererzungen S Tharsis. Die zur Zeit erfolgversprechend eingesetzte Hg-Szintillometrie stand leider nicht für diese Untersuchungen zur Verfügung.

3.5. Planung und Vorgehensweise

Die Untersuchungen lassen sich ihrer zeitlichen und kausalen Abfolge nach in vier wichtige Arbeitsschritte gliedern:

Geologische Grundlagen → Beurteilung der DS → Konzept und DS-Optimierung → Auswertung, Vergleich Diskussion

Um die Planung und Durchführung übersichtlich und anschaulich darzustellen, ist die Form eines Arbeitsablaufsplanes gewählt. Die Position eines Tätigkeitsfeldes ergibt sich aus der zeitlichen Abfolge und der Zugehörigkeit zu Arbeitsabschnitten. Pfeile bedeuten Verfügbarkeit der Ergebnisse des Startfeldes für das Zielfeld (Abb.2,). Die Arbeiten begannen Im Juni 1983 und wurden im August 1985 abgeschlossen.

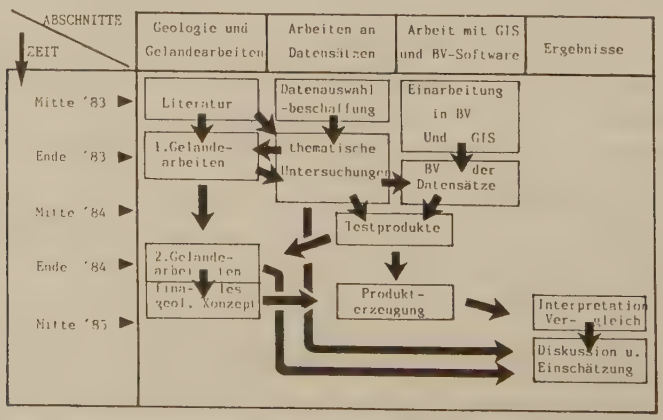


Abb. 2 Arbeitsablaufsplan als Grundlage für die Planung und Durchführung

Besonderer Wert wurde auf die geologischen und lagerstättenkundlichen Grundlagen gelegt, sie bieten die beste Gewähr für eine thematisch sinnvolle und im Ergebnis erfolgreiche Anwendung von methodischen Überlegungen zur Aussageoptimierung der DS. Um so bedeutende aber letztendlich weitgehend subjektive Kriterien, wie die Interpretationsfähigkeit im Ergebnis bestmöglichst beurteilen zu können, wurde eine kritische, persönliche Einschätzung auf einem Vergleich diskutierter Produkte mit bekannter Geologie und Vererzungen aufgebaut. Zusätzliche eigene Detailkartierungen in 5 Schwerpunktsgebieten sollten Ergänzungen liefern und das Bild abrunden.
Schließlich muß betont werden, daß ohne gründliche Geländearbeit zum Kennenlernen aller relevanten Probleme ein substantielles Ergebnis bei der Bearbeitung sehr unterschiedlicher DS kaum erwartet werden kann.

II. DAS TESTGEBIET, SEINE GEOLOGIE UND ERZBILDUNGEN

1. Lage und Geographie

Das bearbeitete Gebiet befindet sich im SW der iberischen Halbinsel, etwa 40 km NW der Provinzhauptstadt Huelva. Die portugiesische Grenze entlang des Rio Chanza im W und die spanischen Ortschaften Paymogo, Cabezas Rubias, Alosno und La Isabel grenzen ein hügeliges, 200 bis 400 m ü.d.M. gelegenes Terrain im Zentrum der SW-iberischen Bergbauprovinz ab (Abb.3 S.15).

Die Erhebungen erstrecken sich als schmale und langgestreckte Züge parallel den bedeutendsten Entwässerungslinien in EW-Richtung. Die in fünf größeren Dörfern ansässige Bevölkerung lebt von Viehzucht und der Produktion von Kork, Getreide und Nutzholz. Ein beträchtlicher Teil der Einwohner von Tharsis, Herrerias und Puebla de Guzman ist in Kieserzabbauen und der zugehörigen Infrastruktur beschäftigt.
Mattoralvegetation, ein 1-2 m hohes Hartlaubbuschwerk mit vereinzelten Bäumen, ist nur noch in Resten erhalten. Große Flächen werden von lockeren Korkeichenpflanzungen und freier Grasweide eingenommen. Ackerbaulich genutzte Areale finden sich in der Nähe der Dörfer. Seit etwa 10 Jahren werden verstärkt flächige Aufforstungen mit Eukalyptus negra durchgeführt. Die Bodenbildung ist flachgründig und überschreitet nur in morphologischen Senken 0,3 bis 0,5 m. Ein A-Horizont ist als humusarmer A_i in Mächtigkeiten von 0,05 m ausgebildet, fördern doch die hohen Temperaturen eine fast vollständige Mineralisation (i.S.d. Pedologie) der organischen Substanz. Der über Tonschiefern anstehende, gut ausgebildete P-Horizont ist sehr arm an organischen Verbindungen und häufig mit gelbbraunen bis roten, oxidischen Fe-Erzphasen angereichert. Er geht scharf in das unzersetzte und kaum im Verband gestörte, anstehende Gestein über. Dieser weitverbreitete Bodentyp kann als typischer Plastosol bezeichnet werden. Auf den silikatischen, sehr differenzierten vulkanogenen Einheiten entwickelten sich ähnlich geringmächtige Böden. Sie unterscheiden sich als subtropische Braunerden im Vorhandensein eines B_v bis B_s anstatt des pelitischen P-Horizontes (Bodenbezeichnung nach SCHROEDER,1978; Horizontklassifikation nach KUNTZE et al.,1981).

Auf mediterran-heiße, trockene Sommer folgen winterliche, atlantische Regen, deren Niederschlagsmaximum zwischen November und Februar liegt. Mit 600 bis 1000 mm Jahresniederschlag muss die Vegetation die lange trockene Sommerzeit zu überstehen (Klimadaten nach Aufzeichnungen der Ca. Tharsis S.A.). Das Vorherrschen von tonigen Gesteinen und das Fehlen von körnigem Alluvium, also die Abwesenheit von nennenswerten Kluftwasser- als auch Porenwasserspeichern zwingt zum Anlegen von Stauseen auch an kleinen Bächen für den Minenbetrieb und landwirtschaftliche Zwecke.

2. Geologie

Die SW-iberische Kiesprovinz wurde von STRAUSS (1965) als ein von der Provinz Sevilla über Huelva in Spanien bis nach S-Portugal sich erstreckender Gürtel devonischer bis mittelkarbonischer Gesteine definiert, in denen in Zusammenhang mit Vulkaniten mächtige, polymetallische Kieserzkörper entwickelt sind. Das Testgebiet stellt einen zentralen und was die Größe und Verteilung der bereits bekannten Vorkommen betrifft, typischen Ausschnitt der Kiesprovinz dar (Abb.3).

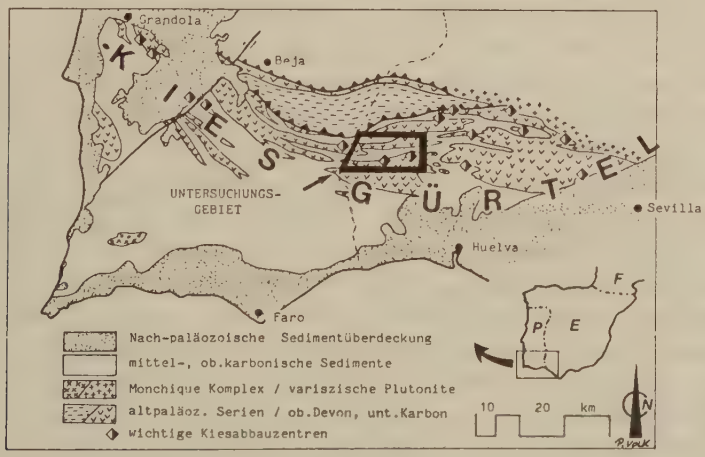


Abb.3 Lage des Untersuchungsgebietes im SW-iberischen Kiesgürtel

2.1. Geologische Erkundung und ältere Arbeiten

Hier wurden durch z.T. mächtige Ausbildung der Oxidationszonen von oberflächennahen Erzkörpern schon in vorgeschichtlicher Zeit Erze gewonnen und verhüttet. Ägypter, Kreter, Etrusker (Tartesser), Phönizier, Griechen und schließlich Römer bauten vorwiegend auf Cu,Ag,Au in den an edleren Metallen reichen Huterzen. Über 25 mio.t. Schlacken aus dieser Periode belegen einen intensiven Bergbau. Zwischen etwa 400 n.Chr. und 1850 wurden nur kleinere Mengen an Erz gefördert und erst mit dem Aufkommen französisch und vor allem britisch finanzierter Bergbaugesellschaften um die Mitte des 19. Jahrhunderts setzte eine stürmische Aufwärtsentwicklung ein. Zum erstenmal wurden jetzt auch die primären, in größeren Teufe liegenden Erze in großem Masstab ausgebeutet. Verbesserte Infrastruktur (Eisenbahnverbindungen, ausgebaute Hafenanlagen) ermöglichten zusammen mit modernen Abbautechniken eine wesentliche Steigerung der Fördermengen. Nach dem 2. Weltkrieg wurden schrittweise fast alle spanischen Minenbetriebe "nationalisiert", d.h. die Mehrheiten des Firmenkapitals von spanischen Interessenten übernommen. Heutzutage tendieren größere Gruben mit ausreichendem Kapital zum Tagebau bis zu 300 m Fördertiefe (Rio Tinto, Aznalcollar, Tharsis usw.).
Aus den inzwischen mehr als 300 Veröffentlichungen geologischer Arbeiten sei hier nur kurz auf die für die geologische Erforschung bedeutendsten und jüngsten eingegangen, eine detaillierte Übersicht Älterer findet sich bei STRAUSS (1965). Allgemeingeologische und geschichtliche Aspekte des Kiesbergbaus finden sich erschöpfend in der Monographie "Pyrites de Huelva" von PINEDO VARA (1963) behandelt, wiewohl schon viele Autoren vor ihm diesen Themenkreis bearbeiteten. Unter den geologisch lagerstättenkundlichen Arbeiten gehören EZQUERRA del BAYO (1832) bis WEBB (1958) zum Lager derer, die eine epigenetisch-hydrothermale Entstehung der Erzkörper für wahrscheinlich hielten. Schon sehr früh tauchten mit KLOCKMANN (1894), STELZNER und BERGEAT (1904) Theorien über eine syngenetisch sedimentäre Entstehung auf, die aber erst mit DOETSCH (1957) und WILLIAMS (1962) vermehrtes Gehör fanden. PINEDO VARA schließlich bestätigte in seiner Monographie die sedimentäre Natur der Kieslager. STRAUSS (1965) arbeitete zuerst in Lousal mit seinen, die sedimentäre Natur gut demonstrierenden, gebänderten Kieserzen und fand letztlich auch in allen anderen

SW-iberischen Kiesgruben Hinweise auf die eindeutig gleichzeitige Entstehung der polymetallischen Erze mit ihrem Nebengestein. Um diese Zeit wurden speziell bei kanadischen, aber auch bei vielen anderen Kiesvorkommen auf Grund der internen Struktur und der Beziehungen zum Nebengestein verstärkt Theorien zur submarin-exhalativen Bildung ihrer massiven, brekziierten und gebänderten Erze laut (HUTCHINSON 1965, LUSK 1972, WATANABE 1970). Sedimentologische Untersuchungen der rezenten exhalativen Erzbildungen, etwa im Thetys- und Atlantistief des Roten Meeres erweiterten die Vorstellungen über die chemischen Bedingungen, die Rolle bakterieller Tätigkeit und organischer Substanz bei der Bildung von buntmetallreichem Sulfid-Erzschlamm als Vorstufen von Pyrit- und Magnetkieslagerstätten (BÄCKER&RICHTER 1973, RICKARD 1973, FRANCHETEAU et al. 1979, EDMOND et al. 1982).
Eine Reihe weiterer Arbeiten im Raum des SW-iberischen Kiesgürtels baute auf den grundlegenden Gedanken einer synsedimentären Bildung auf und widmete sich der geochemischen und geophysikalischen Exploration. STRAUSS et. al. (1974-81) widmeten sich der Beschreibung von Geologie, Geochemie und Geophysik einiger aktiver Gruben, vor allem La Zarza und Tharsis. Besondere Bedeutung hat eine Zusammenfassung der 15-jährigen Erfahrung in der Exploration der Grubengesellschaft Compania de Azufre y Cobre, Tharsis S.A. (STRAUSS et.al.,1977). Hier werden die meisten üblichen Verfahren auf ihre Einsatzmöglichkeiten unter den regionalen Bedingungen diskutiert. FERNANDEZ ALONSO (1963) und FERNANDEZ ALVAREZ (1975) beleuchten geophysikalische Untersuchungsmethoden auf ihre Einsatzmöglichkeiten in der Provinz Huelva. Ihre Arbeiten behandeln dabei vor allem die geoelektrischen und gravimetrischen Verfahren in der Detailexploration. Mehr auf die allgemein-geologischen, mineralogischen und petrologischen Bedingungen der Erzbildung und der sie begleitenden Vulkanite gehen HÖLLINGER (1958), SCHERMERHORN (1970-1975), WILLIAMS (1962), WILLIAMS et al.(1975), KERSABIEC et al.(1976,1979) und SALPETEUR (1976) ein. KOOPMANS (1984) bearbeitete das Gebiet zwischen Tharsis und Rio Tinto strukturgeologisch. Stratigraphische Probleme speziell in den fossilarmen oberdevonischen und unterkarbonischen Tonschiefer - Klastikafolgen behandeln BOOGAARD (1967) und HOFSTETTER et al.(1979). SCHÜTZ (1985) befasst sich mit Magmatismus und Metallogenese im zentralen Pyritgürtel, dieses Werk war jedoch bei Beendigung dieser Arbeit erst angekündigt.

2.2. Stratigraphie und Petrographie

Für die Gesteine des SW-iberischen Kiesgürtels läßt sich eine Dreiergliederung vornehmen:

Hangend: -- Tonschiefer mit einzelnen Grauwackenlinsen und Sandsteinbänken (Kulm), folgend kurz TG genannt

-- Vulkanosedimentärer Komplex bunte Folge aus sauren bis basischen Vulkaniten mit eingeschalteten sedimentären Gesteinen: Tonschiefer, Bitumenschiefer, Kieselschiefer, Grauwacken und Kieserzen, folgend kurz VK genannt

Liegend: -- Tonschiefer mit einzelnen Quarzit- und Sandsteinbänken, folgend kurz TQ genannt

Zwei bedeutende Schwierigkeiten beherrschten lange Zeit eine genauere stratigraphische Gliederung: Zum Einen waren aus den fossilarmen hangenden und liegenden Tonschieferfolgen nur selten brauchbare Fossilien für die Datierung zu gewinnen, zum Anderen scheint sich keine generell gültige Vulkanitabfolge für den gesamten Bereich des Kiesgürtels festlegen zu lassen.

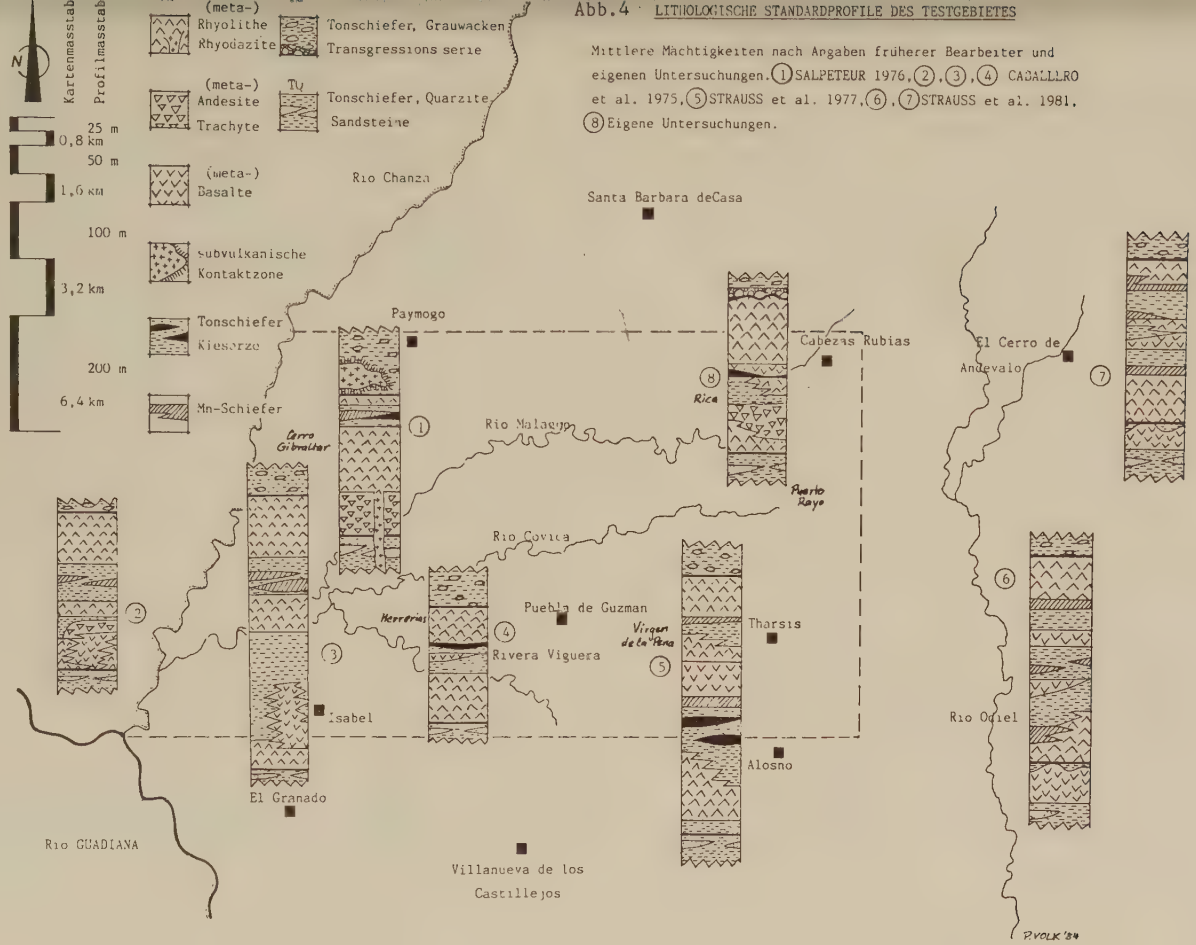
2.2.1. Stratigraphische Profile und geologische Karte

SCHERMERHORN (1971) fasste Datierungen zusammen und entwickelte mit eigenen Untersuchungen ein stratigraphisches Modell für den Kiesgürtel. CABALLERO et al. (1975), SALPETEUR (1976), STRAUSS et al. (1977,1981) erarbeiteten stratigraphische Profile für Teile des Testgebiet und seine unmittelbare Umgebung. Diese Daten sollen auf der Grundlage eigener Erhebungen die Situation skizzieren (Abb.4, S. 18a).

Für die Erstellung der geologischen Karte des Testgebiets waren als Unterlagen drei IGME-Kartenblätter 1:50000 (936,958,959) und diverse großmasstäbliche Kartierungen des Tharsis und La Rica-Gebiets vorhanden. Während des ersten Geländeaufenthaltes wurden etwa 85 km Profile senkrecht zum Streichen der Serien, schlecht dokumentierte (besonders im NE) und problematische Bereiche im restlichen Untersuchungsgebiet selbst aufgenommen. Die Kriterien für die Geländeansprache der vorgefundenen Serien werden im Fol-

Abb.4 LITHOLOGISCHE STANDARDPROFILE DES TESTGEBIETES

Mittlere Mächtigkeiten nach Angaben früherer Bearbeiter und eigenen Untersuchungen. (1) SALPETEUR 1976, (2), (3), (4) CABALLERO et al. 1975, (5) STRAUSS et al. 1977, (6), (7) STRAUSS et al. 1981, (8) Eigene Untersuchungen.



GEBIETES NW THARSIS, PROV. HUELVA

auf der Grundlage der IGME - Karten: mapa geologico de espana 1:50 000
Blatt 936, 958, 959 (1982), unveröffentlichen Karten der Ca.Tharsis S.A.
und eigenen Kartierarbeiten und lithologischen Untersuchungen

genden aufgezeigt. Generell wird der komplexe Aufbau des VK besonders dort deutlich, wo Kartierungen im Masstab 1:10000 und größer vorlagen oder durchgeführt wurden. Auf eine das gesamte Gebiet betreffende stratigraphische Feingliederung mußte verzichtet werden, weil detaillierte Unterscheidungen an den metamorphen und tektonisch beanspruchten Gesteinen schwierig und daher unsicher sind (Abb.5,S.18b). Die von STRAUSS et al. (1977) und CABALLERO et al.(1975) vorgenommenen Unterscheidungen lassen sich nicht auf das gesamte Testgebiet extrapolieren und gelten nur für den südlichen VK - Zug.

2.2.2. Serien des Testgebiets

Die drei großen Sequenzen TG, VK und TQ werden soweit möglich nach Alter, Ausbildung der Gesteine im Aufschluss, Handstück und Schliff, Besonderheiten und Grenzen ihrer Bestimmung benandelt. Die einführende Betrachtung des VK wird seiner Bedeutung für die Exploration wegen in Normalschrift wiedergegeben, alle anderen Teile in Kleinschrift.

2.2.2.1. Tonschiefer-Quarzit Komplex (TQ) - Oberdevon

Die Basis dieser mehr als 1000 m mächtigen Folge ist im Kiesgürtel nirgendwo eindeutig festzulegen. Fossilfunde aus dem medialen Teil des TQ deuten auf unterdevonisches, möglicherweise silurisches Alter für basale TQ-Serien. Im Hangenden, nahe dem Übergang in den VK ist in Kalklinsen und karbonatischen Tonschiefern mit Clymenien und Conodonten sicheres Oberdevon im Übergang zum Karbon nachgewiesen (SCHERMERHORN,1971/1). Im Untersuchungsgebiet sind eindeutig zu bestimmende Fossilien selten, gelegentlich autretender Pflanzenhäcksel, Kriechspuren und umkristallisierte Crinoidenreste geben keine Hinweise. STRAUSS et al.(1977), CABALLERO et al.(1975) charakterisieren den TQ als monotone Tonschieferfolgen (Abb.6), meist braun mit vereinzeltem Serizitgehalt, einzelnen Sandsteinbänken und im stratigraphischen Top häufiger autretenden Quarzit- und Karbonatlinsen. Die eigenen Untersuchungen lassen folgende Verhältnisse erkennen:

Abb.6 Tonschiefer, TQ-Liegendserie S Puebla de Guzman

Im W bei San Isabel fehlen die hangenden Teile des TQ, hier grenzen mediale Serien des TQ an den VK. Sie sind als braun-rötliche Sandstein - Tonschieferfolgen ausgebildet, kaum quarzitisch und ausgeprägt wechsellagernd mit Tonschiefern. Kennzeichnend für ihre Fazies ist innerhalb der Sandsteinbänke graded bedding, kleinräumige Wickelfalten, load- und flute-casts, slumpings und selten auftretende Spurenfossilien. Bestimmbare Fossilien und karbonathaltige Partien fehlen ganz. Man kann hier durchaus von einer Tiefwasser - Flyschfazies sprechen, anders als SCHERMERHORN (1971/1), der lediglich Anzeichen eines Vor - Flyschstadiums fand. Im ungestörten Verband, wie im SE des Testgebiets aufgeschlossen, folgt auf diese mindestens 300 m mächtige Folge ein langsamer Übergang auf Tonschiefer, die nur noch vereinzelt von lateral selten aushaltenden Quarzitkörpern unterbrochen wird.

Diese werden z.T. bis 30 m mächtig (z.B. Virgen de la Pena, W Tharsis), sind ungebankt und bestehen aus weissen, reinen Quarziten mit echter Kornverwachsung (Abb.7). In dieser stratigraphischen Position sind vereinzelt Kalklinsen mit Clymenien und Phacopiden belegt, sie indizieren flacheres Wasser. In der Übergangszone zum VK gehen die Tonschiefer allmählich in buntere Farben über, wobei schließlich mit Einsetzen der vulkanischen Aktivität die politischen Serien mit kräftigem Rot, Schwarz und Gelb überwiegen. Abb.7 zeigt den Schliff eines reinen Quarzits aus der Hangendserie.

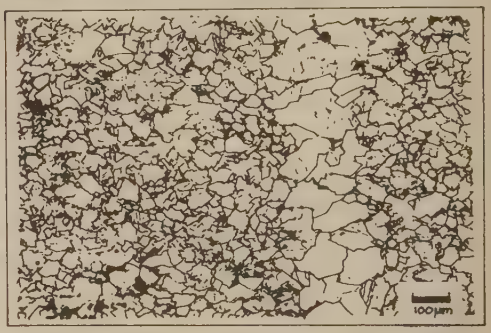


Abb.7 Quarzit, TQ-Hangendserie
Zeichnung nach Schliff, weiss: Quz, schwarz: Korngrenzen, Leukoxen, Mafite

2.2.2.2. Vulkano-sedimentärer Komplex (VK) - Unterkarbon

Da für diese Einheit keine regional gültige stratigraphische Abfolge festgelegt werden kann, werden die Serien des VK im Folgenden nur lithologisch behandelt. Diese für die geologische Arbeit und Explorationstätigkeit wichtigste Gruppe von Gesteinen repräsentiert sowohl petrologisch als auch faziell sehr heterogene Serien im sonst von eintönigen Tonschiefer - Klastikafolgen dominierten Kiesgürtel. Basische bis saure Vulkanite wechsellagern mit bituminösen und bunten Tonschiefern, Manganschiefern, klastischen Gesteinen und Karbonatlinsen. Die unterschiedlichen Serien zeigen sehr kleinräumige Strukturen, häufig sf-parallele Störungen und enge Verfaltungen. Isotopen - Altersbestimmungen lieferten keine brauchbaren Altersbestimmungen. Basische bis saure Effusiva setzten unvermittelt und nahezu gleichzeitig im gesamten Kiesgürtel über Serien des TQ ein, deren sporadischer Fossilinhalt oberstes Oberdevon bzw. unterstes Unterkarbon wahrscheinlich macht. In den hangenden Teilen des VK legen Conodonten in Karbonatlinsen eine Einstufung ins untere Vise nahe, so daß zusammen mit der Festlegung der Basis des hangenden TG - Komplexes in die Wende unteres/oberes Vise diese als Ende der VK - Fazies beschrieben werden kann (SCHERMERHORN, 1971/1).
Obwohl STRAUSS et al.(1977) auf säulige Absonderungen in den Rhyolithen von La Zarza (E des Testgebiets) hinwies und dies als mögliches Zeichen für eine Ablagerung nahe bzw. über dem

Meeresspiegel deutete, sprechen eine Vielzahl von Beobachtungen für große Teile des VK für eine Bildung in tieferem Wasser:

--- Pillow - Lagen ohne litorale Aufarbeitungshorizonte
--- Seltenheit karbonatischer Sedimente (meist in turbiditischen Gesteinen)
--- Flyschfazies im TQ und TG
--- Fossilarmut, kaum benthische Organismen (ausgenommen turbiditische Karbonatlinsen)
--- keine sichere Erosionsdiskordanz im VK (aber: an einer Stelle der Grenze VK/TG)
--- keine Flachwasser - Strukturen in Tuffiten und Sedimenten

Folgende lithologische Gruppen können unterschieden werden:

1. massige Vulkanite (Laven und Subvulkanite) } vulk. Fazies
2. Tuffe } vulk. Fazies
3. Tuffite } vulk. Fazies
4. bunte Tonschiefer } sediment. Fazies
5. schwarze Tonschiefer mit Kieserzen* } sediment. Fazies
6. Manganschiefer } sediment. Fazies
7. Karbonate, klastische Sedimente } sediment. Fazies

*Kieserze werden in Kapitel 2.4. gesondert behandelt

Vulkanite

Problematisch ist die Einordnung der Vulkanite sowohl nach ihrem mineralogischen Bestand als auch nach ihrer Erscheinungsform im Gelände. Dies ist von Wichtigkeit, da Vorstellungen zur Genese der vergesellschafteten Kieserze den Beziehungen Vulkanite - Erze besondere Bedeutung beimessen (SCHERMERHORN 1971/2, STRAUSS et al. 1977).

Modale Bestimmungen am Schliff sind schwierig, da vorhandene Glasanteile zu einem mikrokristallinen, schwer bestimmbaren Filz rekristallisierten und außer Quarz fast alle Einsprenglinge zu Chlorit, Epidot und Serizit degenerierten.

Ein Sammeldiagramm geochemischer Analysen Gesamtalkali zu SiO_2 aus verschiedenen Gebieten des Kiesgürtels zeigt eine lückenlose Reihe von basischen bis extrem sauren Proben (Abb.8 S.21a). Obwohl SALPETEUR (1976) die einzigen geochemischen Daten aus dem Testge-

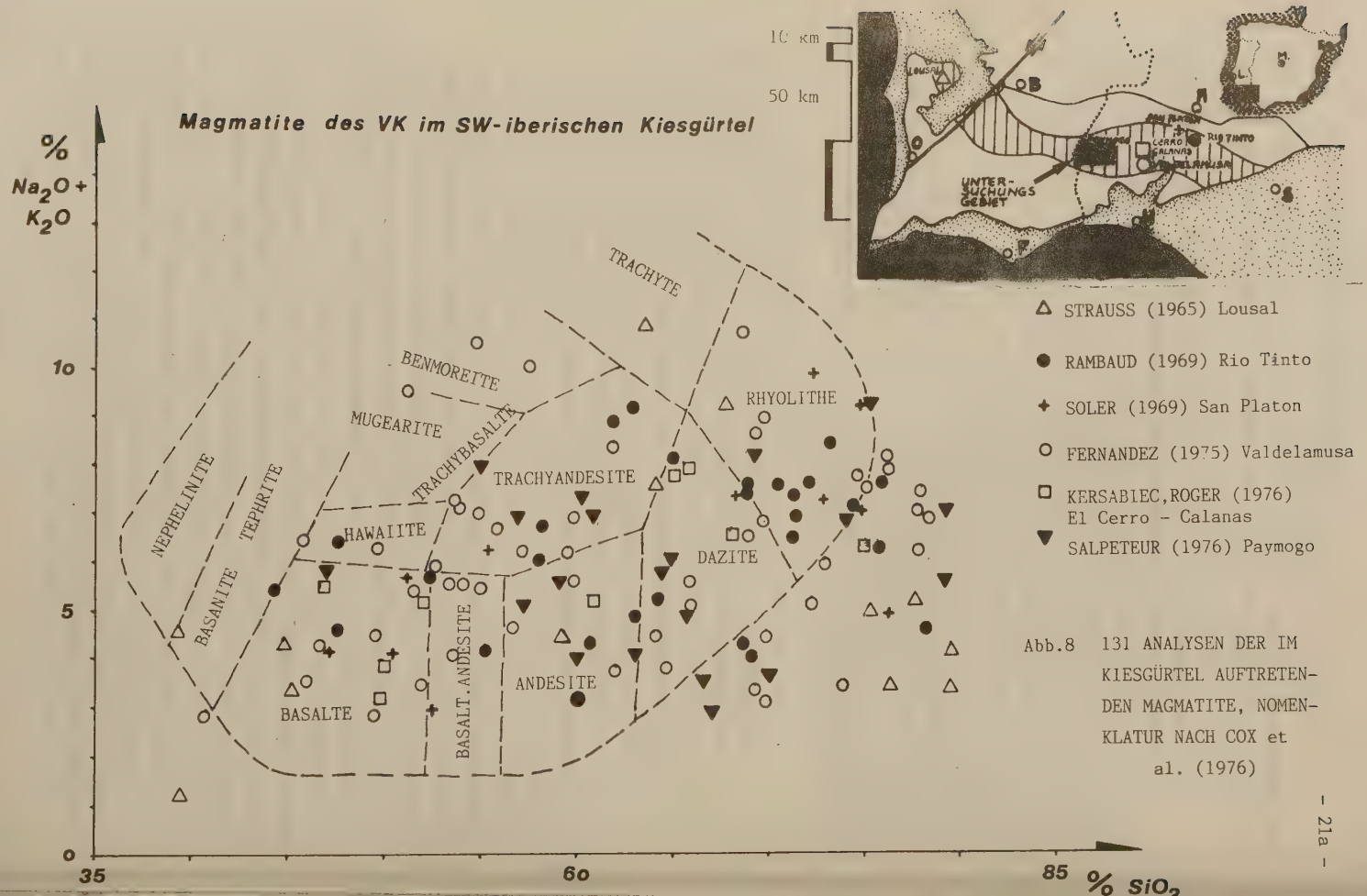


Abb.8 131 ANALYSEN DER IM KIESGÜRTEL AUFTRETENDEN MAGMATITE, NOMENKLATUR NACH COX et al. (1976)

biet selbst stellt, können alle anderen Analysen als repräsentativ angesehen werden. SCHERMERHORN (1971/1) und STRAUSS et al. (1977) weisen auf die weitgehende Entsprechung der verschiedenen Vulkanite über den gesamten Bereich des SW-iberischen Kiesgürtels hin. Vorgenannte Autoren betonen auch die Na - Vormacht in allen Vulkaniten. Auf der Grundlage eines von COX et al. (1979) vorgeschlagenen Systems für K-arme Gesteine zwischen basaltischen und rhyolitischen Vulkaniten läßt sich ein Großteil der Analysen als andesitisch-dazitisch beschreiben.
Gemeinsam aber zeigt das Diagramm also eine weitgehend kontinuierliche Reihe der SiO_2 - Gehalte von 40 - 80% und eine Streuung unabhängig von Gebiet und Bearbeiter. Die Gesamtalkaliwerte bewegen sich zwischen 1 und 10% und zeigen zwischen 3 und 8% ein deutliches Maximum. Diese breite Streuung ist möglicherweise z.T. auf Alkalienaustausch mit Meerwasser und Umwandlungen während der Metamorphose zurückzuführen. Bemerkenswert ist die Alkaliarmut einiger Rhyolithe und Dazite, stark alkalische Vulkanite sind selten. Tatsächlich streut auch das nach megaskopischen Gesichtspunkten ermittelte Spektrum der Vulkanite im Testgebiet zwischen basaltischen und rhyolitischen Gesteinen.
STRAUSS (1965) unterscheidet in seiner grundlegenden Arbeit über die Geologie der SW-iberischen Kiesprovinz Diabase, Quarzkeratophyre, Keratophyre und Quarzporphyrite. SCHERMERHORN (1970,1971/1) spricht daneben von Spiliten und Albit - Diabasen. CABALLERO et al.(1975) kategorisieren basische, saure und intermediäre Vulkanite neben einem intrusiven, feldspatreichen porphyrischen Gestein (porfido feldespatico intrusivo) im Gebiet W Puebla de Guzman. FERNANDEZ ALVAREZ (1975) hält sich bei seinen Bestimmungen an die Nomenklatur nach STRECKEISEN (1975). SALPETEUR (1976) beschreibt in seiner Arbeit über die Geologie des Gebietes um Paymogo die auftretenden Magmatite als "roches meta-dacitique, meta-rhyolitique und intrusives". STRAUSS et al.(1977) beschränkt sich auf die Termini "felsic, intermediate und basic volcanics".

Da es sich bei den im Testgebiet vorkommenden Magmatiten nach eigenen Untersuchungen um solche von basaltischer, rhyolitischer und in beträchtlichem Umfang auch andesitisch-dazitischer Zusammensetzung handelt, soll eine Bezeichnung in Anlehnung an die Benennungen von FERNANDEZ ALVAREZ und SALPETEUR zusammen mit

einem Hinweis auf die metamorphen Mineralneubildungen (Aktinolith, Pumpellyit, Prehnit) verwendet werden. Diese sind im allgemeinen nur in den vulkanischen Serien sicher zu bestimmen, obwohl auch die Sedimente schwach metamorph überprägt sein dürften. Bei Letzteren ist aber abgesehen von einer Phyllitisierung und Chloritisierung ein Nachweis wesentlich schwieriger. Alle Vulkanite werden also als meta-Gesteine bezeichnet, im Gegensatz zu den Sedimenten.

Gegenüber den vorliegenden geologischen Karten (IGME, Ca.Tharsis S.A.) ergeben sich einige Verschiebungen in der Bezeichnung, einige als leukokrate Effusiva eingestufte Serien sind nun als dazitisch-andesitisch anzusehen (z.B. N Tharsis).

Im Gelände lassen sich folgende Gruppen unterscheiden:

--- meta-Rhyolithe

--- meta-Dazite und -Andesite

--- meta-Basalte

Stärker alkalische Gesteine eines trachytischen Vulkanismus treten im Testgebiet nur in sehr kleinen Flächen und selten auf (Ausnahme: Cabezon - Laven im äußersten SW des Testgebiets). Diese sollen als

--- meta-Trachyandesite

ausgehalten werden.

Alle erstgenannten drei Gruppen haben Äquivalente als meta-Tuffe, wobei die SiO_2-reicheren in ihrer Häufigkeit deutlich überwiegen.

- meta-Rhyolithe

Ein besonderes Merkmal einiger rhyolitischer Magmen ist ihre relative Alkaliarmut und der hohe SiO_2-Gehalt (Abb.8 S.21a). Tatsächlich läßt sich dies im Gelände und im Handstück als ausgezeichnetes Unterscheidungskriterium zu den anderen Vulkaniten verwenden. Immer bilden sie vegetationsarme Härtlinge und sind an zahlreichen, eingeschalteten Quarzlinsen weithin kenntlich. Betrachtet man die Grenzen zu anderen Gesteinen, so fällt ihr stockförmiges Auftreten und eine geringe laterale Orientierung auf. Im Handstück sind Fließgefüge selten, die Struktur oft chaotisch. Sie zeigen rein weisse Farbe und z.T. porphyrisches Gefüge. Große korrodierte Quarze, Plagioklase und seltener, serizitisierte Kalifeldspäte bestimmen den erkennbaren Mineralbestand. Mafische Minerale und deren chloritisierte Zersatzprodukte fehlen häufig ganz. Kritisch ist die Abgrenzung im Übergang zu den meta-Daziten. Am Handstück fällt bei den von SALPETEUR (1976) geochemisch und modal bestimmten meta-Rhyolithen und -Daziten auf, daß im Übergang zu den Daziten freie Quarzeinsprenglinge seltener und kleiner werden, die Grünfärbung zunimmt (Chlorit, Epidot).

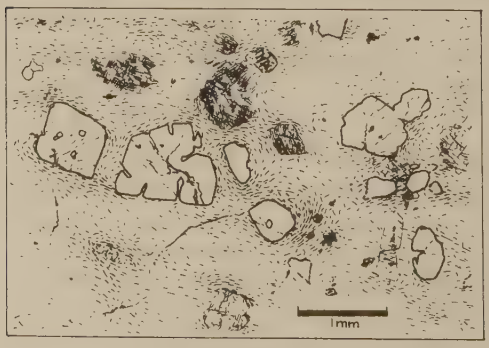


Abb.9 meta-Rhyolith, E Paymogo
Zeichnung nach Schliff, weiss: Quz, Plag, stark umrandet: korr. Quz, gegittert: serizitisierte Kf, schwarz: Mafite, Glimmer

Frische unverwitterte meta-Rhyolithe zeigen bestenfalls eine hellolive Farbe, nicht korrodierte, idiomorphe Quarze sind selten. Im Schliff sieht man Feldspäte meist in einem mikrokristallinen Filz mit Quarz verwachsen oder als Phänokristalle (Abb.9).
Rhyolitische meta-Tuffe sind meist geringmächtig, begleiten einzelne Lavenkörper oder treten als stratiforme Einschaltungen in den Tonschiefern des VK auf. Gerade die Grenzen zu den Tonschiefern sind selten scharf, oft sieht man graduelle Übergänge. Gut aufgeschlossene Profile in der Entwicklung von Laven über Tuffe und Tuffite zu Tonschiefern findet man bei La Rica (W Cabezas Rubias). Bei Tierras de Pedro (SE San Isabel) enthalten solche Tuffe wie die assoziierten Laven verbreitet kleine Pyritidioblasten. Da die rhyolitischen Magmen, wie auch die dazitischen in direktem Zusammenhang mit den stratiformen Kiesvererzungen gesehen werden, wurde versucht, Beziehungen zu verschiedenen Eruptionszyklen herzustellen (STRAUSS et al. 1977). So ist für den südlichen Teil des Testgebiets eine Korrelation zwischen lokalen rhyolitischen Ereignissen nachgewiesen. STRAUSS et al. und CABALLERO et al.(1975) erkannten, daß die wirtschaftlich interessanten Vorkommen an die hangenden Serien einer ersten Eruptionsphase gebunden sind. Das stockförmige Auftreten läßt aber eine solche Parallelisierung oft problematisch erscheinen. Im nördlichen Teil sind meta-rhyolitische Vulkanite weit weniger häufig, aber auch hier sind sie öfter in der Nähe von Vererzungen aufzutreten (Rica, Romanera). Lokal höhere Kalium-Gehalte in Form von serizitisierten Kf-Phänokristallen erscheinen auffallend häufig als isolierte Körper in unmittelbarer Nähe der Erzfazies, Beispiele sind W Tharsis, S Romanera, SW Cabezas Rubias zu finden. Dies gilt auch für Gesteine mit geringerem SiO_2-Gehalt, an den beschriebenen Lokalitäten wechseln K-Rhyolithe mit albitischen, rhyodazitischen Vulkaniten. Insgesamt sind jedoch die K-reichen Varietäten weniger verbreitet.

- meta-Dazite und -Andesite

Die Grenze der Nomenklatur von Daziten nach COX et al.(1979) lässt immer noch helle Gesteine erwarten. ein unterschiedlicher Anteil aus sekundärem Chlorit, Epidot und Leukoxen verursacht grünlichbraune, oft stark zersetzt wirkende Serien. Morphologisch sind sie unauffällig, neben rhyolitischen Laven und basaltischen Gesteinen bilden sie eher Verebnungen. Verquarzungen sind selten. Trotz aller Diversität im Aufschluss gibt es unter der Lupe Gemeinsamkeiten: Quarzeinsprenglinge, meist korrodiert, und Plagioklase, seltener Kalifeldspäte kennzeichnen ein porphyrisches Gefüge mit feinkristalliner Grundmasse. Pseudomorphosen von Chlorit nach Pyroxen oder seltener, erhalten gebliebene Pyroxene sind wichtige Hilfen. Ein Fließgefüge ist häufig gut ausgebildet. Als Spezialfälle dürfen einzelne kleinere Intrusivkörper mit dioritischer Zusammensetzung gedeutet werden. Sie sind im nördlichen VK-Zug kartierbar und zeigen eine bis 20 m breite Hornfelsfazies-Zonierung in TG-Tonschiefern. Da sie aber immer gangartige oder linsenförmige Körper mit maximal 100 m Mächtigkeit bilden und fein- bis mittelkörnig ausgebildet sind, möchte ich sie als subvulkanische Fazies zur dazitisch-andesitischen Magmengruppe stellen (Diorite von Romanera, SALPETEUR 1976). Im Schliff sind Pyroxene und Feldspäte meist zersetzt und fast immer von Leukoxensäumen umgeben. Rosettenförmige Chloritaggregate finden sich immer wieder. Als Feldspäte dominieren Abreiche Plagioklase, aber auch völlig serizitisierte Kalifeldspäte treten in den Alkalireicheren Gesteinen auf. Ein Vulkanitkörper besitzt hohen Magnetitgehalt (S Paymogo), dieser ist sowohl in xenomorphen Erzaggregaten als auch diffus in der Grundmasse verteilt. Zirkon und Klinozoisit sind in manchen Laven häufige Akzessorien, auch myrmekitisch verwachsener Quarz und Plagioklas wurde beobachtet.

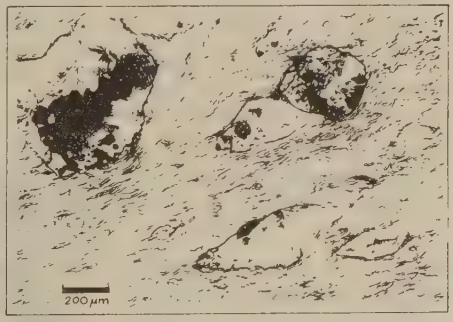


Abb.10 meta-Dazit-Tuff, N Isabel
Zeichnung nach Schliff, weiss,umrandet: Quz, Plag, weiss,Grundmasse: Quz, Plag,Kf,Akzess. schwarz: Leukoxen,Chlorit

Tuffe dazitischer und andesitischer Zusammensetzung sind die häufigsten Pyroklastika im Untersuchungsgebiet, sie sind weiter verbreitet als die zugehörigen Laven. Sie zeigen eine beträchtliche Variationsbreite ihrer Strukturen. Kristalltuffe (Tierras de Pedro, La Rica), fein- bis grobkörnige Tuffe (bis 10 mm Ø, im ganzen Gebiet) und solche mit Fluidaltexturen (Pseudoignimbrite, kleine verstreute Vorkommen) belegen diese Vielfalt. Ihre Unterscheidung im Gelände zu Tuffen anderer Zusammensetzung und auch zu intermediären Laven ist schwierig. Die Farbe (deutlich grünbraun), Textur und das Fehlen idiomorpher und unzerbrochener Quarze und Feldspäte ermöglichen eine megaskopische Beurteilung. Spuren eines ursprünglich wohl verbreiteten Pyritgehaltes lassen sich an einzelnen erhalten gebliebenen Idioblasten und der Form mancher Leukoxenhöfe ablesen.

- meta-Basalte

Diese Gruppe von Gesteinen ist im VK des Testgebiets ungleichmäßig verteilt, im SW werden größere Flächen eingenommen, im übrigen Gebiet treten sie nur sporadisch und untergeordnet auf. Zwei Formen sind unterscheidbar: stratiform aushaltende, geringmächtige Spilite mit feinkörniger Struktur und gangartige, lopolithförmige, mittel- bis grobkörnige Diabase. Beide lassen Horizonte mit Pillow-Bildungen erkennen, die ihren submarinen Charakter belegen (Abb.11). In der Morphologie verhalten sich die gangartigen und stratiformen Basalte nicht auffällig. Die großen Flächen der von der Erosion angeschnittenen Lopolithkörper dagegen bilden ausgedehnte flachgewellte Hochflächen mit einzelnen Felsburgen. Am Handstück zeigen alle meta-Basalte grüne bis schwarzgrüne Farben, häufig idiomorphe, Ab-reiche Plagioklase, kleinere Pyroxene und immer deren Zersatzprodukt Chlorit. Spilite lassen manchmal Fluidaltexturen erkennen. Interessant sind Vorkommen stratiformer Spilite in unmittelbarer Nähe von größeren Erzkörpern (N San Guillermo und Sierra Bullones, Filon Sur, Herrerias), sie waren Grund für Überlegungen über genetische Verbindungen zwischen Vererzungen und dem Auftreten basaltischer und rhyolitischer Magmen in engem Kontakt (SCHERMERHORN 1970, STRAUSS et al.1977). Die intrusiven Basalte zeigen bei größerer Mächtigkeit deutlich über die schwache regionale Metamorphose hinaus kontaktmetamorph beeinflusste Zonen in der Größenordnung von bis zu 20 m (S Puebla de Guzman, W Cabezas del Pasto). Bei CABALLERO et al.(1975) wird von sehr kleinen Peridotitvorkommen berichtet, die im äußersten S des Gebietes in Basaltkomplexen eingeschlossen auftreten. Als Hauptbestandteile werden stark zersetzter Olivin und Pyroxen angeführt. Die eigenen Arbeiten konnten keine solchen Körper bestätigen, partiell höhere Gehalte an mafischen Zersatzprodukten sind sporadisch immer zu finden.

Abb.11 Pillows im Basalt
Straßenaufschluss Tierras de Pedro E San Isabel

Abb.12 Spilit, Tagebau Filon Norte Tharsis, Zeichnung nach Schliff, weiss: Grundmasse aus Plag.,Chlorit, Amphibol, Quz, gepunktet: Karbonat, Leisten: Pyx (Augit), schwarz: Erz

Im Schliff zeigt sich ein ophitisches Gefüge ineinander verwachsener Plagioklase und Pyroxenleisten (oft reliktisch) mit geringeren Anteilen an Amphibolen, Apatit und Erz. Freier Quarz ist selten. Dunkle Minerale sind chloritisiert und selbst die Plagioklase zersetzt. Modale

Bestimmungen speziell dieser Gesteine sind in vertretbaren Fehlergrenzen kaum möglich. Die Spilite sind durch ihre Feinkörnigkeit noch schwieriger zu untersuchen, sie zeigen aber u.d.M. größere xenomorphe Karbonat-Aggregate (Abb.12).
Basaltische Tuffgesteine sind selten und nur an entsprechende Laven gebunden, ihr laterales Aushalten ist aber deutlich größer als das SiO_2-reicherer Tuffe. Zum Teil können noch Lapilli als undeutliche Strukturen im Handstück zu erkennen sein (N San Isabel).

- meta-Trachyandesite

Solche alkalireichen intermediären Gesteine sind auf eine Lokalität beschränkt, sie bilden einen 4 km langen, bis 300 m mächtigen Zug morphologisch erhabener Vulkanite im äußersten SW des Testgebiets. Sie zeigen im Gelände typische konzentrische Schälstrukturen (ähnlich Pillows) im m-10m Masstab und sind durch ihre dunkelolive Farbe und die deutliche Fluidaltextur gut von anderen Serien zu unterscheiden. Eine intrusive, subvulkanische läßt sich von einer effusiven Fazies trennen. Hauptmineral ist fast reiner Albit (An 5-10%) und daneben bis zu 10% chloritisierte Pyroxene. Erwähnenswert sind karbonatgefüllte Vakuolen, so daß der Karbonatgehalt bis zu 30% betragen kann (CABALLERO et al.1975). Der freie Quarzgehalt ist gering. Entsprechende Tuffe sind als lithologisch selbständige Einheit nicht auszuhalten.

- meta-Tuffite, sedimentäre Brekzien

Weil umgelagerte Vulkanite und Tuffe in sedimentärer Umgebung (vorwiegend Tonschiefer) in allen Übergangsformen auftreten, ist ein einheitliches Ausscheiden nicht möglich. Durch Schieferung, Metamorphose und wohl zum beträchtlichen Teil auch Autometasomatose entstanden problematische Übergangsglieder der im Handstück an sich schon schwer unterscheidbaren Gesteine meta-Tuffe und Tonschiefer. In der Geländeansprache seien sie daher nach dem Überwiegen sedimentärer oder vulkanischer Komponenten diesen Gruppen zugeordnet. Im Schliff lassen sich bei vulkanischem Material mit höherem porphyrischem Kristall- und niedrigerem Glasanteil am Verhältnis zu den sedimentären Tonmineralen Unterscheidungen leichter vornehmen.

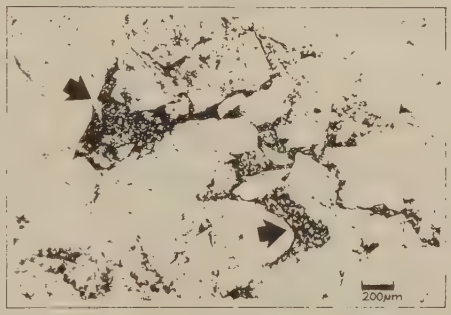


Abb.13 rhyolitische Brekzie in Tonschiefer, W Tharsis, Zeichnung nach Schliff, weiss: rhyol.Bruchstücke, schwarz: erzhaltige schwarze Tonschiefer, Pfeile: organogene Strukturen?

Sedimente

- bunte Tonschiefer

Die Tonschiefer des VK sind im Gelände an drei Eigenschaften gegen diejenigen des TQ und TG abzugrenzen, obwohl die Unterscheidung schwierig sein kann:
1.immer serizitisiert, 2.schwache bis starke Tufführung, 3.häufig bunte bis stark bunte Farben
Die Glimmerneubildung ist aber nicht so weit fortgeschritten, um sie als Phyllite einzustufen. Die Serien befinden sich außerdem oft in lateralem Kontakt mit Tuffen, Laven, schwarzen Tonschiefern, Kieserzen und Manganschiefern. Ihre Verwitterung erzeugt flache Verebnungen, die aber selten mehr als 0.5 m tonigen Boden entwickeln (Pelosol). Im Handstück läßt der Tonschiefer engständige Schieferung erkennen, die meistens eine eventuell vorhandene Feinschichtung vollkommen maskiert. Ein feinschuppiger Serizitbelag ist auf den Schieferungsflächen häufig, ebenso ein durch die Verwitterung erzeugter Belag von Fe- und Mn-Oxiden. U.d.M. können vereinzelte Siltitbänder in dem nach sf eingeregelten Quarz-Serizitfilz gesehen werden. Schwerminerale sind akzessorisch und sehr selten.

- schwarze Tonschiefer

Lokal verändern sich die Tonschiefer zu geringmächtigen, bituminösen Serien, die oft sichtbar kleine Pyritidioblasten führen. STRAUSS (1965) fand in Proben seines "Graphitschiefers" mehr als 10% FeS_2 und 6% organischen Kohlenstoff. Die erhöhte Kohlenstoffführung in Tonschiefern ist ein in der unmittelbaren Umgebung der Kieserzkörper bekannter Umstand. Dies trifft nicht

nur auf das Testgebiet zu, im ganzen Pyritgürtel und bei vielen anderen Kieserzlagern ist dies beobachtet und beschrieben worden. Echter schuppiger Graphit konnte lediglich im Kontaktbereich einer sf-parallelen Aufschiebung gefunden werden, also dort, wo tektonisch bedingt höhere Drucke und Temperaturen aufgetreten sein müssen (Filon Norte, Tharsis). In der Oxidationszone entwickelt sich als Besonderheit zwischen schwarzen Tonschiefern und Kieserzen eine bis mehrere 10er m mächtige gebleichte und zersetzt wirkende Serie weisser Gesteine aus ehemaligen schwarzen Tonschiefern und untergeordnet auch Tuffen und Tuffiten. Sie entsteht durch die bei der Oxidation des Pyrits mit Atmosphärilien frei werdende Schwefelsäure, wobei Kohlenstoff in Form hochmolekularer Paraffine , feinverteilter Pyrit (beides in Schwarzschiefern) und Luftsauerstoff zu CO_2, H_2O und Fe_2O_3 oxidiert werden. Die gebleichte, weisse Saumserie ist also ein unmittelbarer, oberflächennaher Anzeiger für erhöhten Pyritgehalt. Sie weist oft noch Relikte von aufgelösten Pyritidioblasten auf. In Schliffen finden sich neben hohem Opakanteil (Erz) veränderte Organismenreste. Radiolarien, vererzte Bakterien als Kolonien und viele schwer identifizierbare organische Bruchstücke sind typisch für einen Schwarzschiefer (vgl.Abb.13). Kleine idiomorphe Pyritkristalle (bis 1 mm ⌀), Konkretionen mit konzentrisch-schaligem Aufbau und radialstrahlige Erzaggregate sind stellenweise angereichert.

- Manganschiefer

Als auffällig gefärbte Serien wurden sie mit "manganese formation" (STRAUSS et al.1977), "polvo hematites" (BERNARD&SOLER 1974, SALPETEUR 1976), "pizarras vinosas" und "jaspes" (CABALLERO et al.1975) und schließlich als "cherts, slaty cherts and jaspers" (SCHERMERHORN 1971/1) bezeichnet.

Im Untersuchungsgebiet fallen das lateral weite Aushalten und folgende lithologische Gemeinsamkeiten auf:

1. pelagische Sedimentation
2. oft stark verkieselt, Radiolarienführend
3. partiell starke Führung von Hämatit und Mn-Erzen

Ich möchte diese Serie sowohl nach kennzeichnendem Erzinhalt als auch nach ihrer vorherrschenden Ausbildung als Manganschiefer bezeichnen. An die lokalen Mn-Anreicherungen sind zahlreiche kleine Gruben und Schürfe gebunden, die im Testgebiet z.Zt. alle inaktiv sind. Durch die hohe Silikatführung sind sie topographisch auffällig, bilden schmale Rippen, die weithin zu verfolgen sind. An einzelnen Stellen sind kräftig weinrot gefärbte, äußerst harte Jaspislagen aufgeschlossen, die linsen- bis blattförmige Körper (m ⌀) darstellen. In ihrer Nähe treten dann auch häufiger konkretionäre, supergene Psilomelan- und Pyrolusitbildungen auf, die bei mehreren m Ausdehnung beschürft wurden. Über große Flächen sind die Manganschiefer jedoch als silifizierte, durch Mn- und Fe-Führung schwarzrot gefärbte Schieferserie ausgebildet, die mancherorts auch lateral in bunte Tonschiefer und Tuffe übergeht (W Tharsis). Unter der Lupe und im Schliff zeigen vor allem die kieseligen Partien einen hohen Anteil an Radiolarien, deren Skelette vererzt sind. Lagenweise Sedimentationsänderungen (Silte, Tone, Radiolarien und Mn-Erz) erzeugen ein primäres, schichtiges Gefüge mit häufigen Internstrukturen (Abb.14).

Abb.14 Manganschiefer, Mina del Toro SE Paymogo, Zeichnung nach Schliff, weiss: Quz., schwarz: Hämatit, Pyrolusit, Psilomelan z.T. als vererzte Radiolarien

- Karbonate und Klastika

Im bearbeiteten Gebiet fehlen die sonst typischen Vertreter einer Flachwasser- und Schelfsedimentation. Auftretende Karbonate und klastische Sedimente haben geringe Mächtigkeiten und sind im Streichen nie aushaltend. Strukturlose dunkle Karbonatmassen sind konkordant und diffus in manche Kieserzkörper eingeschaltet (Filon Norte, Tharsis); kleinere Körper, ebenfalls konkordant, aber in Tonschiefern (auch des TQ!) und Tuffen werden von STRAUSS (1965) aus Lousal beschrieben, dort führen sie noch schwer erkennbare, da vollkommen umkristallisierte Crinoidenreste. Grauwacken und Sandsteinbänke sind in den VK-Tonschiefern selten und bilden dm bis m mächtige Linsen, die durch Form und Internstruktur (Gradierung) auf Tiefwasserbildungen hindeuten. Die Karbonate in unmittelbarer Nähe der Erzkörper zeigen im Schliff eine Zusammensetzung aus fast reinem, grobkristallinem Karbonat (Ca,Mg,Fe-Mischkarbonat) mit geringen Anteilen an Quarzdetritus, Serizit und Pyrit. Erkennbare Organismenreste fehlen.

2.2.2.3. Tonschiefer - Grauwacken Komplex (TG) - ob. Unterkarbon

Nach Ende der starken vulkanischen Tätigkeit im VK setzt die Ablagerung mächtiger Tonschieferfolgen mit Sandstein- und Grauwackenbänken sowie noch vereinzelten Tufflagen ein. Der Übergang ist an einer Stelle im Testgebiet durch eine Erosionsdiskordanz scharf gekennzeichnet (SW Cabezas Rubias). Sonst scheint sich der TG eher konkordant aus dem VK zu entwickeln. Die bei Kartierarbeiten zur Detailkarte um La Rica entdeckte Diskordanz wird durch eine zwischen 5 und 50 m mächtige Serie vollkommen gerundeter, dunkler Quarzitgerölle von cm bis dm-Größe gebildet. Sie stehen in einer sandig-tonigen Matrix genau am Kontakt VK-TG an und sind nur über eine Länge von etwa einem km nachweisbar. STRAUSS (1965) berichtet ebenfalls von einer schwach ausgeprägten Schichtlücke und Diskordanz zwischen VK und Kulm (TG) im Gebiet von Lousal. Von anderen Autoren werden Diskordanzen nicht erwähnt. SCHERMERHORN (1971) spricht von einer konkordanten Folge des Kulm (TG) über den VK. Weitere Erosionsdiskordanzen wurden im Testgebiet nicht beobachtet, dies hängt wohl zum Teil mit häufigen E-W streichenden Aufschiebungen zusammen, die auffallend häufig diese stratigraphische Grenze markieren und eine eventuell vorhandene Transgressionsserie amputiert haben könnten.

Zu Beginn der TG-Sedimentation sind verbreitet olivhellbraune, mächtige Silt- und Sandsteinfolgen aufgeschlossen. Im Handstück zeigen diese auf sf-Flächen fleckenartige (1-5 cm Ø) Tonschmitzen, die mit pflanzlichen Fossilien verwechselt werden können. Kennzeichnend sind diese Serien nahe des konkordanten Überganges VK-TG, direkt nördlich des südlichen VK-Zuges als bis zu 300 m mächtige Folge beispielhaft zu kartieren. Im Schliff lassen sich Quarze, Glimmer, Schwerminerale und Erz bestimmen. Typisch sind einzelne Quarzitbruchstücke vom Typ TQ-Quarzit und eine lagenweise Orientierung der Komponenten (Abb.15). Feldspäte sind selten und meist als serizitisierte Phänokristalle erhalten. Dies spricht für eine Herkunft des klastischen Materials von einzelnen erodierten Rücken des TQ und VK. Im Hangenden setzt Tiefwassersedimentation ein mit hellbraunen Tonschiefern und vereinzelten Grauwackenlinsen. Rhyolithe, Dazite, Erzkörner, Manganschiefer und Quarzite sind als Gesteinsbruchstücke festzustellen. Die Grauwacken sind aus Aufbau und Struktur als fossile "channel"-Füllungen und Turbiditfächer zu deuten. Slumping, graded bedding und ausgeprägte load casts sprechen für eine Flyschartige Fazies. Fossilführung ist häufiger als im TQ und VK, es wurden vereinzelt Posidonien und Goniatiten bestimmt, die den Beginn der TG- Sedimentation an die Basis des oberen Vise legen (WILLIAMS 1934). Im Untersuchungsgebiet konnten bisher keine Altersbestimmungen durchgeführt werden, die über den Wechsel Vise/Namur hinausgehen. In Südportugal dagegen bestimmte SCHERMERHORN (1971/1) im Kulm (TG) auch Faunen des Namur und Westfal. Mächtigkeiten können daher auch nur über die Abschätzung der bis ins Namur reichenden Sedimente angegeben werden, STRAUSS&MADEL (1974) sprechen für den spanischen Teil des TG von maximal 500-1000 m.

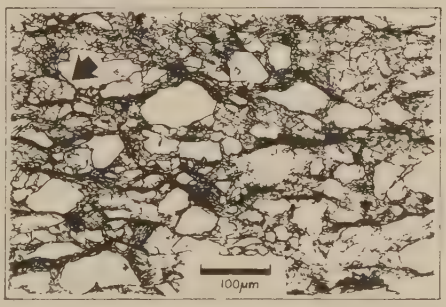


Abb.15 TG-Sandstein N Tharsis
Zeichnung nach Schliff, weiss: Quz, gepunktet: Plag, gegittert: Pyx, Pfeil: Quarzitbruchstück, schwarz: Glimmer, Erz, and. Mafite

2.2.3. Der variszische Sedimentationsraum

Zusammenfassend lassen sich die sedimentologischen Bedingungen des TQ, VK und TG im Untersuchungsraum so beschreiben (Abb.16):

TQ: Durchgehend Beckenfazies, im Hangenden verstärkt Schüttung von Turbiditen (z.T. karbonatisch), an der Grenze zum VK vereinzelt Flachwasserindikatoren

VK: Flache Beckenfazies, mit vulkanischen Rücken, die gegen die Wende VK/TG vereinzelt Anzeichen von Flachwasserbedingungen zeigen, sporadisch Diskordanz zu TG

TG: Kräftige Klastikadeposition der in der Wende VK/TG erodierten Rücken in flache Beckenfazies, rascher Übergang auf Tiefwassersedimentation. Aus dem Norden fortschreitende Klastika - Schüttung

Im VK zeigt sich eine fazielle Differenzierung zwischen südlichem und nördlichem Zug (s.Abb. 5 S.18b). Der südliche Teil ist charakterisiert durch großflächige meta-Basalt - Vorkommen, lateral weitaushaltende Manganschieferfazies und die Dominanz der rhyolitischen über dazitisch-andesitische Vulkanite. Im N sind basaltische Eruptiva weit seltener, intermediäre Gesteine überwiegen die sauren und Manganschiefer bilden keine lateral langaushaltenden "marker horizons".

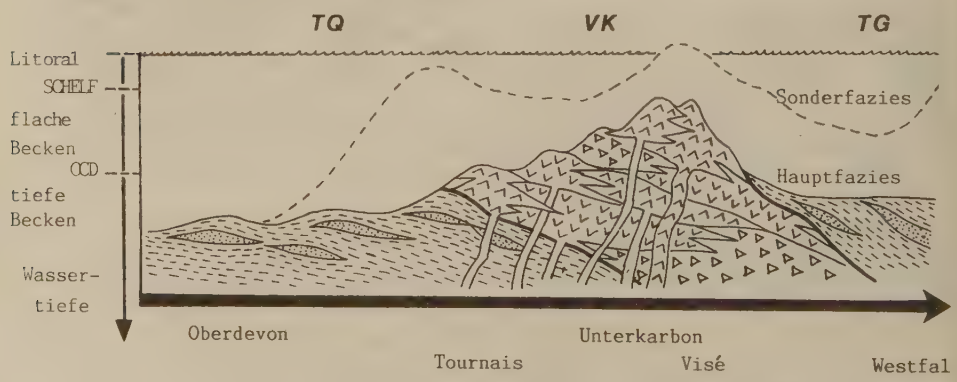


Abb.16 Modell des TQ/VK/TG - Sedimentationsraumes im Testgebiet

2.2.4. Metamorphose und jüngere geologische Geschichte

Fast alle früheren Arbeiten im Kiesgürtel betonen den Einfluß einer schwachen Regionalmetamorphose. Erst BOOGAARD (1967) und schließlich SCHERMERHORN (1975/2) versuchten eine fazielle Feingliederung der Verhältnisse. BOOGAARD konnte in Pomarao (nahe der SW - Ecke des Testgebiets) Prehnit/Pumpellyit Fazies nachweisen, SCHERMERHORN nahm an modalen Analysen der basischen bis intermediären Vulkanite des VK eine Subfazieszonierung im mittleren Teil des Kiesgürtels vor (Abb. 17a,b).

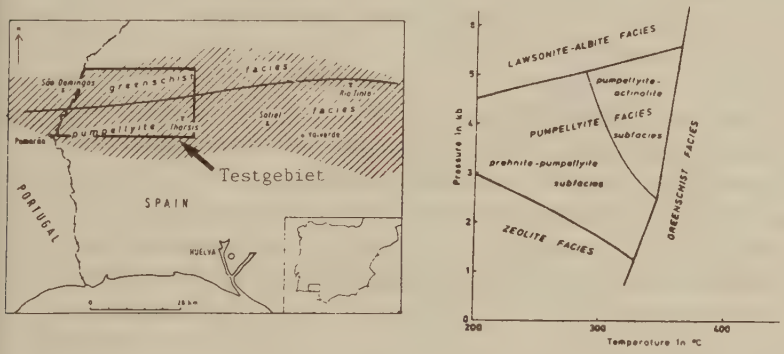


Abb. 17a) Subfazieszonierung im Testgebiet b) im p-T Diagramm nach SCHERMERHORN (1975/2)

Als Indikatoren benutzte er die in vulkanischen Gesteinen des VK beobachtbaren metamorphen Neubildungen Prehnit, Pumpellyit und Aktinolith. Die eigenen Untersuchungen konnten diese Ergebnisse im Wesentlichen bestätigen, obwohl Teile des VK und fast der ganze TQ und TG kaum einen sicheren Metamorphosenachweis erlauben. Im N des Untersuchungsgebiets sind höhergradig metamorphe Gesteine (Grünschiefer/Glimmerschieferfazies) anzutreffen, so z.B. im Bereich der Beja - Aracena Antikline. Im S dagegen klingen Anzeichen metamorpher Veränderungen aus. Für den mittleren Teil des Kiesgürtels wird mit einer regionalen Metamorphose gerechnet, die unter 6-10 km Auflast (SCHERMERHORN) und mit einem im N wesentlich stärkeren Wärmefluß die Gesteine umbildete. Da die Hauptphase der Einengung und eine subsequente Schieferung für das mittlere Westfal datiert wurden, im Schliff immer wieder Chlorit - Porphyroblasten über sf - Flächen hinwegwachsen, kann die metamorphe Überprägung erst mit oder nach dem oberen Westfal stattgefunden haben.

Ein wichtiges Kriterium für eine grobe Geländeansprache der lokalen Bedingungen ist die Serizitisierung der Tonschiefer. Lokale Anomalien führt SCHERMERHORN auf Variationen des H_2O - Partialdruckes oder die unterschiedliche Überlagerungsmächtigkeit zurück. Als wahrscheinliche andere Ursache kann allerdings der Zusammenhang zwischen der Annäherung an kompetente Serien des VK und einer dadurch lokal erhöhten Druckspannung in den Tonschiefern gesehen werden. Diese Glimmerneubildung muß dann aber mit der Hauptphase der orogenen Einengung geschehen sein. Geländebeobachtungen ergaben schwach ausgeprägte Aureolen einer erhöhten Glimmerführung um größere Vulkanitkörper zusätzlich zur allgemein festzustellenden Serizitisierung , beobachtet wurden sie z.B. N Tharsis, W Cabezas Rubias und S Paymogo. Ein solcher Bezug könnte m.E. als Geländeverfahren zur Erkennung von unter flacher Bedekkung liegender VK - Züge herangezogen werden.
Kontaktmetamorphe Zonierungen um subvulkanische meta-Dazite und - Basalte zeigen Hornfelsfazies und intensive Glimmerneusprossung in m bis 10er m Umkreis (Subvulkanite bei Romanera, meta-Basalte S Puebla de Guzman).

Vom mittleren Karbon bis ins Quartär sind keine Serien im Untersuchungsraum bekannt, nicht einmal Reliktvorkommen. Da die Landschaft deutlichen Peneplaincharakter hat, der erst wieder durch junge Erosion entlang der Täler überprägt wurde (Tertiär/Quartär), ist der Schluß naheliegend, daß zumindest für große Teile des Mesozoikums keine Sedimentation erfolgte. Im S des Kiesgürtels sind tertiäre Ablagerungen als mächtige Folgen von siltigen Tonen, Sandsteinen und Kalken in ehemaligen morphologischen Bekken und tektonischen Senken erhalten. Sie sprechen für eine übergreifende Transgression der SW-iberischen Plattform. Erhalten sind im Untersuchungsgebiet nicht einmal sporadische Reste. Eine junge und steile Talbildung in der gehobenen Altlandschaft schuf erst im Neozoikum wieder ein erkennbares Relief. Ausgedehnter und seit mehreren Jahrtausenden anhaltender Bergbau schuf verbreitet kleinflächige Abraumhalden und Umlagerungen von Huterzen und Nebengestein.

2.3. Tektonik

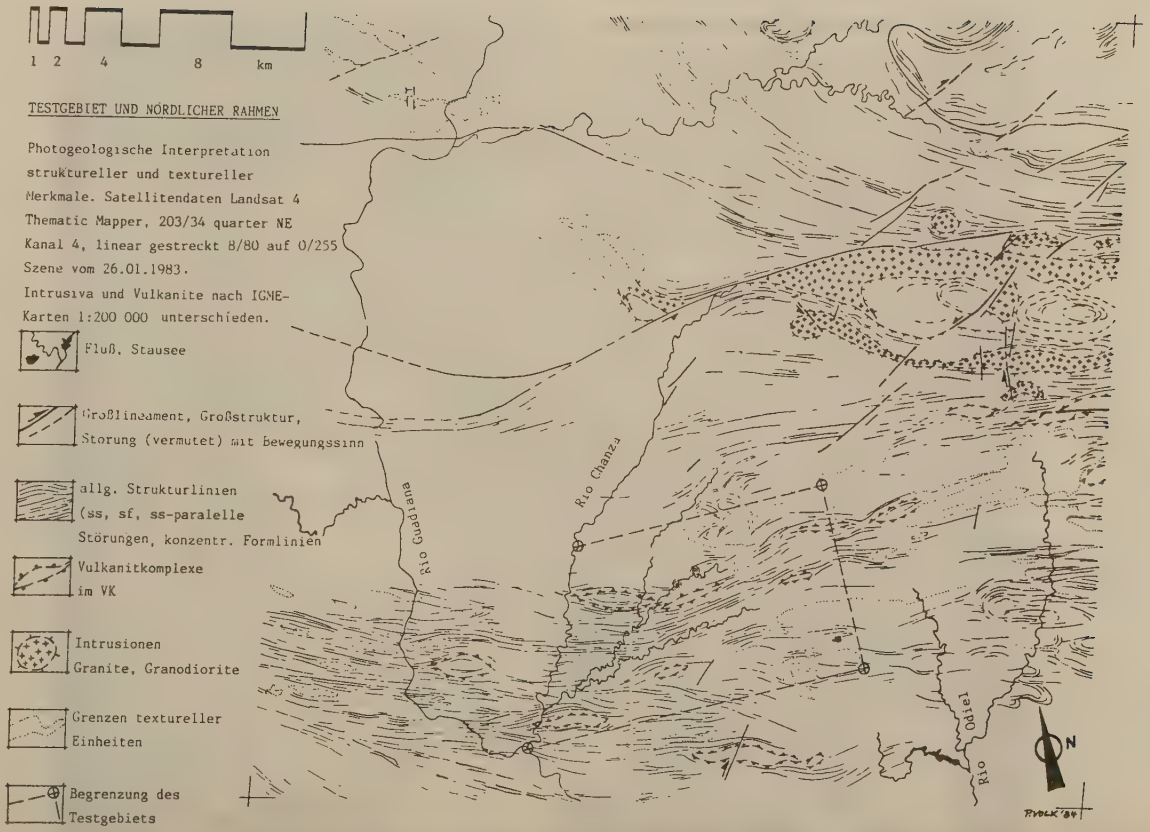
Die Geschichte tektonischer Forschung im SW-iberischen Kiesgürtel beschränkte sich im wesentlichen auf die Unterscheidung verschiedener Schieferungszyklen und die Rekonstruktion der Faltenstrukturen (SCHERMERHORN 1971/1). Die Erkenntnis der synsedimentären Entstehung der großen Kieserzlager und die geringe Rolle von Gangvererzungen drängte eine Untersuchung der Klufttektonik völlig in den Hintergrund. Große Probleme bereiteten vor allem die Unterscheidung variszischer von nachvariszischen Strukturen, ferner die Differenzierung zwischen Schieferungszyklen und Schichtung.

In diesem Kapitel soll ein umfassender Versuch unternommen werden, die Tektonik eines Kerngebietes im Kiesgürtel systematisch zu behandeln, dies unter besonderer Berücksichtigung einer strukturellen Auswertung von Fernerkundungsdaten. KOOPMANS (1984) brachte erste Ansätze dazu, als er im Gebiet E Tharsis die strukturelle Interpretierbarkeit von abbildenden Radardaten (SAR 580) mit Landsat- (MSS) und Geländedaten verglich und tektonische Aussagen ableitete.

2.3.1. Tektonischer Rahmen des Testgebiets

Die Serien der variszischen Geosynklinale schmiegen sich im Streichen der heute erkennbaren, gefalteten Züge dem alten, ebenfalls gefalteten präkambrischen bis devonischen Rückland im N an. Granitische und dioritische Intrusionen fügen sich dem bogenförmigen Generalstreichen weitgehend. Da sie in devonische bis kambrische Serien (Klastika, Tonschiefer, Eruptiva) eindrangen, aber offensichtlich durch orogene Vorgänge mitverformt wurden, sollten sie mindestens so alt wie die Haupteinengungsphase sein. Dies steht in Übereinstimmung mit den Gedanken von SCHERMERHORN (1971/1), er sieht die Intrusiva als gleichzeitige bis jüngere Äquivalente der sauren bis intermediären Vulkanite des VK. LOTZE (1945) erkannte in der strukturell ähnlich gebauten Zone S des Kristallinmassives Beja - Aracena (Antiklinale nach SCHERMERHORN, 1971) einen der zentralen iberischen Geosynklinale angefalteten Flyschtrog ("Südportugiesische Zone"). Als bestimmende Strukturen dieses unmittelbar N des Testgebietes gelegenen Bereiches weist die geologische Karte von Spanien 1:1000000 zwei bedeutende E - W

Abb.18b


1 2 4 8 km
TESTGEBIET UND NÖRDLICHER RAHMEN
Photogeologische Interpretation
struktureller und textureller
Merkmale. Satellitendaten Landsat 4
Thematic Mapper, 203/34 quarter NE
Kanal 4, linear gestreckt 8/80 auf 0/255
Szene vom 26.01.1983.
Intrusiva und Vulkanite nach IGME-
Karten 1:200 000 unterschieden.
Fluß, Stausee
Großlineament, Großstruktur,
Storung (vermutet) mit Bewegungssinn
allg. Strukturlinien
(ss, sf, ss-paralelle
Störungen, konzentr. Formlinien
Vulkanitkomplexe
im VK
Intrusionen
Granite, Granodiorite
Grenzen textureller
Einheiten
Begrenzung des
Testgebiets
Rio Guadiana
Rio Chanza
Rio Odiel
N
P.VOLK '84

Viele Autoren sprechen für den Bereich des Kiesgürtels von mindestens zwei Faltungsphasen, wobei beide zugehörige Schieferungsgefüge erzeugten; SCHERMERHORN (1971/1) betont, daß Anzeichen für eine regionale zweite Faltungs- und Schieferungsepoche vorliegen. Bei meiner Arbeit konnte ich aber weder aus den Geländedaten noch unter dem Mikroskop einen schlüssigen Nachweis für das Untersuchungsgebiet erbringen.
Gelegentlich beobachtete Faltenstrukturen und Schieferung, deren Achsenlage vom Generalstreichen abweicht (STRAUSS, 1965) können auch als Folge lokal "gedrehter" Spannungsfelder während einer länger andauernden Deformationsphase aufgefasst werden. Solche Erscheinungen treten vor allem im Druckschatten kompetenter Gesteinskomplexe auf und können zusammen mit reliktischer Feinschichtung auch zur Annahme einer zweiten sf- Generation führen.

Die variszische Tektonik begann im Untersuchungsgebiet mit der Heraushebung einzelner Inselrücken zu Beginn des oberen Vise (Erosionsdiskordanz VK/TG). Im Verlauf des Vise oder Namur erreichte vermutlich der TG - Komplex seine Sedimentationsmaximum und im mittleren Westfal wurde die geosynklinalen Serien stark verfaltet, z.T. überschoben und verschiefert. Die schließlich versteiften und der iberischen Meseta angefalteten Serien wurden final noch von einer schwachen Bruchtektonik erfaßt. Der saure bis intermediäre Plutonismus im Rückland N des Untersuchungsgebietes wird als kratonische Ausprägung des effusiven VK - Vulkanismus angesehen (SCHERMERHORN, 1971/1).

2.3.2.1. Problem Schieferung - Schichtung

In den monotonen Tonschieferserien des TQ/TG ist bei Abwesenheit klastischer oder vulkanischer Einschaltungen oft nur die Schieferung erkennbar. Selten kann aus einer "Griffelbildung" auf ehemalige Sedimentationsflächen geschlossen werden. Da die Schieferung nicht immer engständig ist, oft über Tuffe und vereinzelt auch Vulkanite hinweggreift, auch Minerale zwischen Schieferungsflächen einregelte, kann lediglich über erkennbare Meiler- und Fächerstellungen die Lage in einer Falte ermittelt werden. Oftmals ist selbst das bedenklich, da ausgeprägte Winkeldifferenzen fehlen. Die spricht für eine langanhaltende, konstante Beanspruchung und weitgehende Plättung originärer sf - Flächen. Fast alle Schieferungsflächen stehen sehr steil und fallen nach N ein (s.a. Abb.20 S.36a). Ein seltenes Beispiel einer von inkompetentem auf kompetentes Material übergreifenden Schieferung demonstriert Abb.19

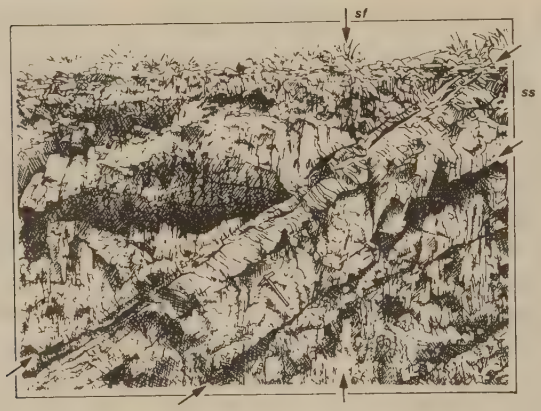


Abb.19 Schieferung in Tonschiefer und Sandstein, S Lagunazo

Jede Geländebeobachtung einer ss- und sf-Fläche mußte kritisch unter diesen Gesichtspunkten geprüft werden.

2.3.2.2. Bruchlose Verformungen

Die in der geologischen Karte (Abb.5 S.18b) erkennbare Verteilung der Serien des TQ, VK und TG läßt einen weitspannigen Faltenbau erwarten. Fünf N - S Profile von insgesamt 85 km Länge wurden während zweier Geländeaufenthalte begangen und geologisch aufgenommen (Anhang 1). Abb.20 S.36a zeigt in perspektivischer Darstellung die erhobenen Strukturdaten. Folgende Befunde wurden dabei festgestellt:

--- Isoklinaler, schwach N - vergenter Faltenbau, Wellenlängen zwischen 2 und 5 km

--- Spezialfalten mit Wellenlängen im 100 - 10 m Bereich sind in der Faltenstirn häufig (VK)

--- Aufschiebungen selten in der Faltenstirn, d.h. keine bc - angelegten Aufschiebungen

--- Stratigraphisch verschieden tiefe Niveaus angeschnitten (TQ, VK, TG)

--- Faltenstrukturen im TG können selten mit Sicherheit nachgewiesen werden, es gibt jedoch Hinweise auf eine intensive und kurzwelligere Verfaltung dieser Serien (W Tharsis, Puerto Rayo N Tharsis)

In der Auswertung der Thematic Mapper Szene (Abb.18b S.33b) deutete sich bereits eine konzentrische Lineamentbildung um extrusive Körper des VK an. Sehr viel detaillierter läßt sich dieser Effekt in der Interpretation eines stark vergrößerten Ausschnittes (1:50000) desselben Bildes demonstrieren (Abb.21). Für Lineament gilt hier und im Folgenden die Definition nach O'LEARY et al.(1976).

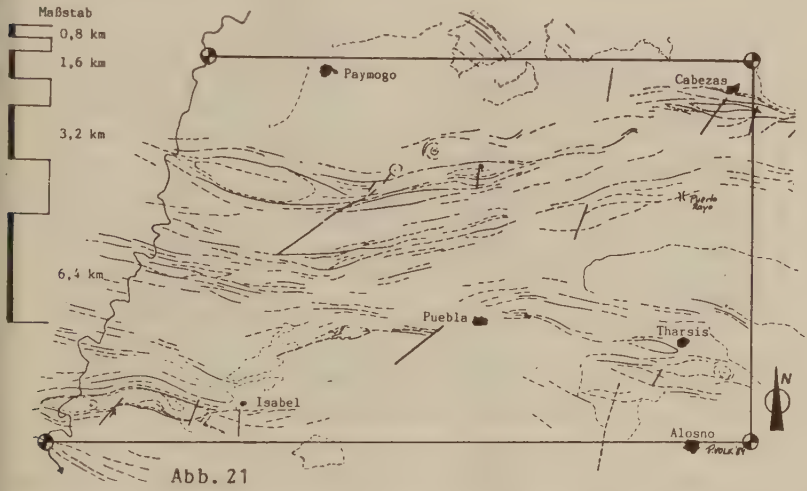


Abb. 21

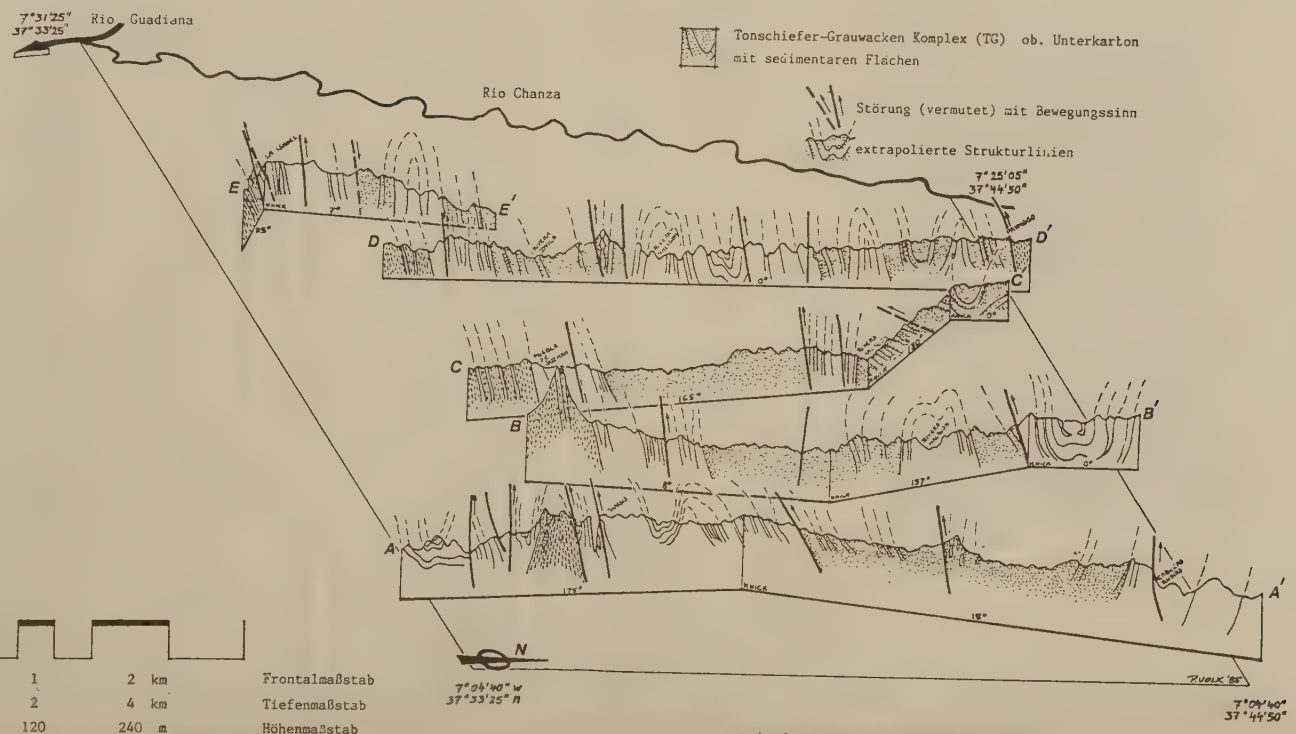
Legende siehe Abb.18bS.33b

STRUKTURELLE UND TEXTURELLE DETAILAUSWERTUNG, LANDSAT-TM QUARTER INTERPRETIERT IM MAßSTAB 1:50 000

Saure und intermediäre Vulkanite der beiden VK-Züge bilden deutlich elliptische bis lanzettliche Körper, sind dem Generalstreichen gemäß eingeregelt und von konzentrischen Formlinien umgeben, die auffallend ausspitzen. Die Formlinien sind beim Vergleich mit der geologischen Karte dort zu finden, wo abwechslungsreiche Tonschiefer, Manganschiefer- und Tuffolgen des VK anstehen (Ausnahme Puerto Rayo, N Tharsis). Beachte auch die Übereinstimmung textureller Grenzen mit geologischen, die intermediäre bis basische Gesteine von anderen Serien trennen. Einige der Strukturen setzen über die kartierte Ausdehnung des VK hinweg.

Eine stereoskopische Lineamentauswertung aller streichenden Strukturen von schwarz/weiss Luftbildern im Masstab 1:25000 (IGN Madrid, 1974, Bildflug 523 Nr.236-278,6686-6710) zeigt ebenfalls eine Häufung um massige Vulkanitkörper (Abb.22 S.37). Beim Vergleich mit der Lithologie sind die höchsten Lineamentkonzentrationen in den abwechslungsreichen Tuff-, Manganschiefer- und Tonschiefer - Wechsellagerungen (Randfazies der effusiven Zentren im VK) zu finden. Aktive Abbaue und großflächige Halden haben naturgemäß infolge Abschattung, Überstrahlung oder Maskierung geringe Dichten. Laterale Fortsetzungen des bekannten VK unter TG - Bedeckung können dort vermutet werden, wo hohe Dichten sich vom

Abb.20 PARALLELPROJEKTION DES TESTGEBIETS UND DER PROFILSCHNITTE A–A′ bis E–E′ auf der Basisfläche 0 m ü.NN. Vertikal 8-fach überhöht. Verzerrungswinkel 30°, Tiefenmaßstab 1/2 des Frontalmaßstabes, Vorderkante streicht Nord – Süd.



VK in kartierten TG hinein fortsetzen. Einige Störungen bzw. Störungszonen kündigen sich durch abweichendes Streichen der Serien an (SW Paymogo, NW San Isabel, S Tharsis).
Bei einer statistischen Aufbereitung ergab sich als generelles Streichen aller Serien im Testgebiet 100°, die mittlere Länge aller ss-parallelen Lineamente beträgt 300 m.

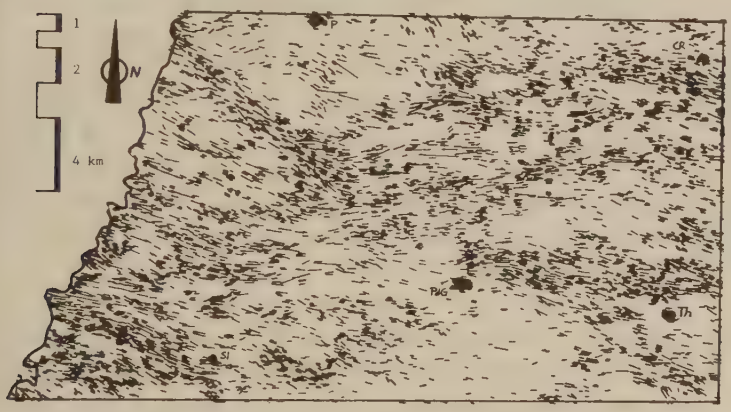


Abb.22 Lineamente aller ss- und sf-parallelen Strukturen des Testgebiets weniger als 15° vom Generalstreichen abweichend, 5300 Luftbild - Lin.

Zusammenfassend:

--- Massige Vulkanite sind durch ihr mechanisch kompetentes Verhalten während Deformationen an geringerer Dichte der streichenden Lineamente zu erkennen, sie zeigen ein "Ausspitzen" und eine Einregelung in die Tonschieferserien

--- Die sie begleitenden, lithologisch stark wechselnden Serien des VK und teilweise des Liegenden TG zeichnen sich durch hohe Dichten aus. Infolge ihrer mechanischen Inkompetenz fügen sich die Lineamente der Lage der Vulkanitkörper an und verstärken großteils ihre Erkennbarkeit

--- Schieferung und Schichtung von TQ und TG sind nur dort mit ähnlichen Dichten zu erkennen, wo Sandsteine oder Grauwacken - Bänke anstehen. Ansonsten weisen sie über große Flächen wenige dem Generalstreichen parallele Strukturen auf

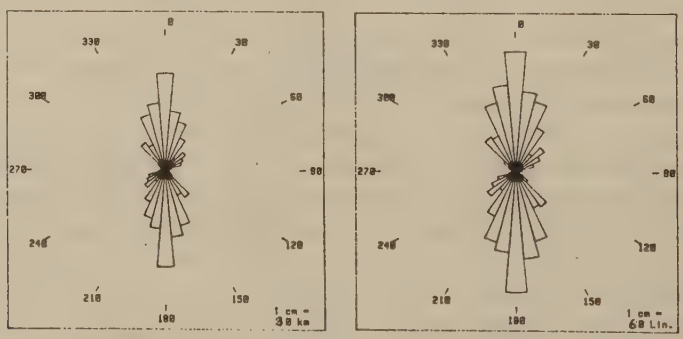
--- ss-parallele Störungen sind nicht von ss und sf zu trennen

--- Profildaten belegen einen ausgeprägten, langwelligen Faltenbau, der vor allem an lithologischen Grenzen durch Störungen unterbrochen wird

2.3.2.3. Bruchhafte Verformungen

Die Profilaufnahme (Anhang 1) ergab eine Dominanz steiler, N-fallender Aufschiebungen. Von 23 kartierten, größeren Störungen und Störungszonen zeigten 17 diese Merkmale, bei den restlichen war ihre Natur unklar. Die Aufschiebungen streichen weitgehend parallel dem Generalstreichen (Ausnahme: S Tharsis). Sie lagen anders als von KOOPMANS (1984) ermittelt, selten in der Faltenstirn, eher scheinen sie sich unter flachen Winkeln aus sedimentären Flächen der Flanken entwickelt zu haben. In der Nähe solcher Störungen sind lithologische Wechsel (kompetentes/inkompetentes Material) verbreitet. In der geologischen Karte (Abb. 5 S. 18b) fallen als querschlägige Störungen zwei Bündel auf, ein häufigeres NE - SW System und ein auf das Gebiet SW Tharsis beschränktes NW - SE System. Beide zeigen Versätze bis zu 500 m und sind ihrer Natur nach Blattverschiebungen ohne Vertikalkomponenten.

Die Luftbildauswertung aller vom Generalstreichen mehr als 15° abweichenden Lineamente wurde mit dem Statistik - Programmpaket LINEBN (HENKEL, 1982) durchgeführt. Die Analyse nach Anzahl und Gesamtlänge ergab eine klare Dominanz der 0° Richtung mit beigeordneter symmetrischer Streuung von 0°-20° bzw. 160°-180°. Zwei wesentlich kleinere Maxima erscheinen bei 140° und 50° (Abb.23). In Korrelation mit Geländedaten läßt sich das absolute Maximum mit ac-, die konjugierten, kleineren Häufungen mit hk0-Störungen erklären.



Gesamtlaenge in km

Anzahl der Lineamente

Abb.23 Luftbild-lineamentanalyse aller mehr als 15° vom generellen Streichen abweichenden Phänomene, 550 Messungen im Testgebiet, Gesamtlänge und Anzahl pro 10°-Sektor

An wenigen Stellen zeigt sich ein anormales Strukturverhalten:
so streuen kurze Lineamente an mehreren eng umgrenzten Flächen S und SE Paymogo sehr stark. An einer Lokalität wird deutlich, daß es sich hier um massige, magnetithaltige Laven dazitischer Zusammensetzung handelt, deren Klüftung keine bevorzugte Richtung aufweist. Ähnliches ist an einem Hügelzug W Tharsis erkennbar, wobei ein großer Teil der Anomalie mit rhyolitischen Vulkanitstöcken in Verbindung gebracht werden kann. Für den weiter W gelegenen Teil ist die Ursache unklar. Kurze, konzentrische Formlinien ("Zwiebelschalenmuster") kennzeichnen einen Bereich im äußersten SW des Testgebiets. Es handelt sich um meta-trachytische Gesteine, die sich durch dieses Struktur - Merkmal hervorragend aus dem Luftbild kartieren lassen. Alle diese Anomalien sind mit massigen Laven saurer bis intermediärer Zusammensetzung korrelierbar und daher ein wichtiger Hinweis auf ausgedehntere vulkanische Förderzentren im VK.

Bei der Geländearbeit fallen neben rechtwinklig zu den Serien streichenden Brüchen (ac) vor allem NE - SW und NNW - SSE orientierte Strukturen mit deutlichen Versätzen auf. Die Letzteren treten fast ausschließlich im VK auf und lassen sich weder in TQ noch TG hineinverfolgen. Dieses als Scherflächenpaar (hk0) aufgefasste Bruchsystem läuft beim Übergang in die inkompetenteren Tonschiefer - Komplexe in schwer nachweisbare Flexuren aus (Hinweise aus Abb. 18b S. 33b).

Um Hinweise auf das tektonische Verhalten der kompetenten massiven Erzkörper zu erhalten, wurde im massiven Pyriterz des Filon Norte (Tharsis) an drei Stellen das Kluftinventar erhoben. Jeweils mehr als 100 Messungen* wurden möglichst dreidimensional ausgeführt und mit dem Statistik - Programm GELI (HAYDN, 1971) ausgewertet. Interpretierte Diagramme und Lage der Messpunkte zeigt Abb. 24 S. 39a; die geologische Karte wurde auf der Grundlage von Unterlagen der Ca. Tharsis S.A. dem Abbaustand im August 1984 entsprechend aktualisiert.

Kriterien für die Auswertung waren:

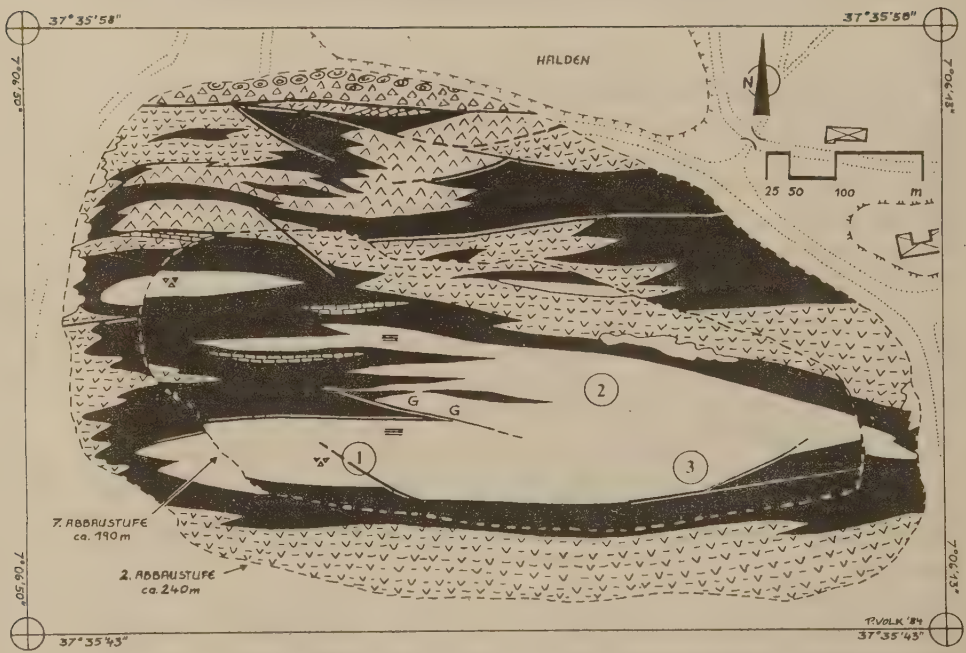
--- Berücksichtigung einmessbarer ss-Flächen

--- einschariges Maximum ± senkrecht zu sedimentären Strukturen markiert ac-Flächen und damit die b-Achse

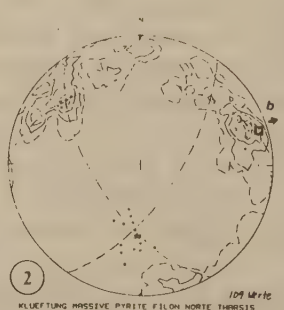
--- Existenz eines primären Kompaktionsgefüges, ausgezeichnet durch trikline bzw. rhombische Symmetrie mit Achsenwinkeln zwischen 70° und 110° (VOLK, 1982).

--- Nähe der Messpunkte zu lokal bedeutenden Aufschiebungsflächen erzeugt subparallele Teilgefüge (JASKOLLA 1978)

* Das Kieserz ist im größten Teil des Filon Norte und San Guillermo Erzkörpers unmagnetisch (vgl. Kap. III/2.2.1.2.)



massives Kieserz
schwarze Tonschiefer
Tuffe + Tonschiefer teilweise vererzt
meta-Basalte Spilite
meta-Rhyodazite mit "pillow"-Gefüge
Karbonatbänke
Bleichzonen
sedimentäre Brekzien
sedimentäre Gefüge
G Graphit
Störungsflächen (vermutet)
3 tekt. Messpunkt
Abbaustufen in m u.NN
Fahrwege
Gebäude
Besetzungsdichte in 1,3,5,7,9,11% Abstufung
ss eingemessene Schichtflächen
b konstruierte b-Achsen
ac-Flächen
hk0-Flächen
Störungsgefüge
sedimentäres Gefüge im Erz



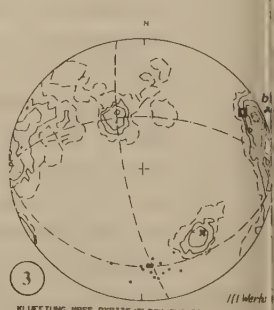


Abb.24 Geologie und kleintektonische Messungen im Tagebau Filon Norte, Tharsis

Unter Berücksichtigung dieser Interpretationsvorgaben ergibt sich:

--- ac-Flächen der Faltung dominant (s. Lineamentanalyse), korrespondierende hk0-Gefüge orientieren sich z.T. an den primären Kompaktionsflächen

--- Lokale Verschiebungen von größter und zweitgrößter, kluftbildender Hauptnormalspannung bei der Sedimentation der Kieserze durch unruhiges Relief des Meeresbodens (vgl. STRAUSS 1965).

--- Keine bc-Flächen, daher ist die Vorstellung einer internen Faltenstruktur unwahrscheinlich

--- Wenig richtungsvariante Häufungen von Flächenpolen sind mit beobachteten Aufschiebungen direkt korrelierbar und können wegen fehlender Sub - Gefügebildung und Überprägung als jüngste Ereignisse angesehen werden.

Die im Tagebau dominanten, langaushaltenden Flächen (mehrere 10er m) haben den Charakter reiner Trennbrüche ohne wesentlichen Versatz und bestätigen eine ac-Indizierung (Abb. 25). Ein ähnliches System konnte auch an anderen massiven Kieserzkörpern beobachtet werden (z.B.La Zarza, E Tharsis).

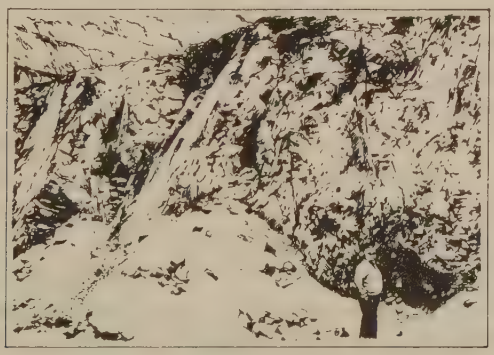


Abb.25 ac - Trennflächen im massiven Pyrit, Tharsis Filon Norte, 8. Fördersohle Blickrichtung S

2.3.3. Hinweise auf nachvariszische Strukturen

Betrachtet man die variszische stukturbildende Epoche mit der Konsolidierung und Angliederung an die NE gelegene ältere Meseta abgeschlossen, so kann nur noch untergeordnet von weiteren tektonischen Ereignissen im SW-iberischen Kiesgürtel gesprochen werden. Infolge fehlender, nachkarbonischer Sedimente lassen sich solche jüngeren Strukturen oft nur schwer datieren*.
Als jüngere Störungen erweisen sich die konjugierten Scherstörungen NW-SE und NE-SW, sie schneiden sf - Flächen. Sie selbst werden allerdings von wenigen ENE-WSW - Flächen gekappt, die sie als jüngste Bildungen im Untersuchungsgebiet ausweisen. KOOPMANS (1984) spricht ebenfalls im Raum E des Testgebiets von solchen Strukturen, deren Ausbildung sie verglichen mit allen anderen Flächen als bedeutend jünger einstufen lässt.
Aus symmetrologischen und deformationellen Betrachtungen können die Ersteren als hk0 - Scherflächenpaar im versteiften Paläozoikum betrachtet werden. Sie orientieren sich an Gefügen, die in den kompetenten Serien des VK bereits im mittleren Westfal bei der Hauptdeformation angelegt wurden. Schließlich fällt noch die Dominanz der linkshändigen NE-SW - Störungen im Untersuchungsgebiet auf. Sie könnte auf eine selektive Rejuvenation bei einer dem Messejana - Ereignis contemporären Beanspruchung zurückzuführen sein (Beginn der Öffnung des Atlantik bzw. der Rotation der iberischen Halbinsel).
Sichere Hinweise auf neozoische Strukturen fehlen, eine seit dem Tertiär anhaltende Hebung der alten Peneplain - Landschaft schuf zwar ein sich deutlich eingrabendes Gewässernetz, wirkte sich aber höchstens geringfügig gefügebildend aus.

2.3.4. Zusammenfassung der Tektonik

Zur Tektonik der VK - Serien:
Der für die Exploration wichtige VK und speziell dessen Vulkanite weichen durch seine von den Tonschiefern des TQ und TG unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften im megaskopischen Gefügebild deutlich ab. Massige Vulkanitkomplexe und Kieserze reagierten im wesentlichen während der Hauptdeformationsphase als kompetente Körper mit ac-Tektonik und fügen sich nur durch die Ummantelung mit inkompetenten Serien (Tonschiefer, Tuffe) in die

* Ausnahme Messejana - Blattverschiebung mit jurassischen Basalten

b- und sf-Tektonik des übrigen Gebiets ein. Lineamentdichtepläne und Strukturverstärkende Darstellungen auf der Basis von Luft- und Satellitenbildern können Hinweise auf die Präsenz von Vulkanitkomplexen und generell Serien des VK auch unter flacher TG - Bedeckung geben.

Zur tektonischen Geschichte:

Aus dem Vorhergegangenen ergibt sich das Bild einer im wesentlichen übersichtlichen tektonischen Entwicklung. Sie sei hier in ihrer Abfolge skizziert.

EREIGNIS	NACHWEIS	ALTER
-Kompaktionsgefüge	Kleintektonik im Kieserz	synsedimentär (Oberdevon - Vise)
-Vorfaltung, Anlage von ac und hk0, bc-Überschiebungen	CABALLERO et al.(1975)	beginnende Einengung (Westfal)
-Hauptfaltung, Ausbildung von ac, hk0, Schieferung	KOOPMANS (1984) Geol. Kartierung Lineamentanalyse	größte Deformationsenergie (Westfal)
-hk0 selektiv weiter ausgebildet	(1 M,Luftbild) Kleintektonik im Erz	Versteifung des Orogens (Westfal)
-2. Faltungs- und Schieferungsphase (im Gebiet unsicher)	Diskordanz SCHERMERHORN (1971)	marginale Tektonik (Stefan)
-linkslaterale Verschiebungen an NE-SW Brüchen, reakt. hk0?	TM-Auswertung, Geländeuntersuchungen	(Mesozoikum?)
-Störungen mit geringem Versatz (ENE-WSW)	versetzen alle anderen Systeme, KOOPMANS (1984)	(Neozoikum?)

2.4. Erzbildungen

Das SW-iberische variszische Rumpfgebirge beinhaltet einige der größten massiven Kieserzkörper dieser Erde. Assoziierte Manganerze haben dagegen rohstoffwirtschaftlich kaum Bedeutung. In diesem Kapitel sollen die Vererzungen vorgestellt und so diskutiert werden, daß sich geologische Beziehungen und Ansätze für verschiedene Methoden der Exploration auf Kieserze ergeben.

2.4.1. Gegenwärtige Bergbauaktivitäten

Im Untersuchungsgebiet werden z.Zt. an zwei Stellen Kieserze gewonnen, im Tagebau bei Tharsis (Filon Norte, San Guillermo) und Untertage bei Herrerias. Bakterielle Laugung eines Teils des Abraums und alter Haldenmaterialien und anschließende Gewinnung von Bunt- und Edelmetallen spielen eine geringere Rolle (Tharsis). Ein kleines Projekt zur chemischen Goldlaugung aus Gossan steht bei La Lapilla (SE Tharsis) vor dem Beginn.
Wirtschaftlich am bedeutendsten ist der Abbau der beiden Erzkörper Filon Norte und San Guillermo durch die Compania de Azufre y Cobre de Tharsis S.A. mit Sitz in Tharsis. Diese Gesellschaft betreibt noch eine andere große Pyritgrube, eine Untertage - Anlage bei La Zarza, ca. 30 km NE Tharsis. Eine eigene Erzbahn bringt das Fördergut nach Zerkleinerung auf handelsübliche Korngrößen zum Verschiffen oder zur Weiterverarbeitung nach Huelva.
Im Tagebau Filon Norte, mit sicheren und wahrscheinlichen Vorräten von jetzt noch mindestens 70 mio t, wird Pyriterz bis zu einem Gehalt von 50% S und 2-3% Cu,Pb,Zn gebaut. Erz und Abraum werden z.Zt. etwa im Verhältnis 1:3 bis 1:4 gefördert. Die Grube Herrerias W Puebla de Guzman wird von der kleineren Gesellschaft Sociedad Minas de Herrerias betrieben und gewinnt Kiese mit bis 48% S bei Buntmetallgehalten von ca. 3%. Einen Überblick über aktuelle Fördermengen der aktiven Minen gibt Tab.2 S.44.
Da sich die Situation am Rohstoffmarkt der letzten Jahre für Buntmetalle, besonders Kupfer weltweit anhaltend schwach gab, wurden die hohen S - Gehalte der massiven, reinen Pyrite noch deutlicher die wirtschaftliche Stütze des regionalen Kiesbergbaus. Höhere Silber- und Goldgehalte in den ausgedehnten Hutzonen und alten Halden der Kiesvorkommen um Tharsis und gute Preise für Edelmetalle führten zu Projekten cyanidischer Laugung. Mangan wird heute im Untersuchungsgebiet nicht mehr gewonnen, die Haupt-

aktivität entfaltete sich zu Beginn des Jahrhunderts an den sehr begrenzten, oxidischen Huterzen der Manganschieferfazies.

	Filon Norte (Tharsis)	Herrerias
1975	ca. 800 000 t	keine Angaben
1980	786 840 t	118 862 t
1981	739 556 t	111 496 t
1982	588 655 t	100 735 t
1983	588 426 t	94 462 t
1984(geschätzt)	630 000 t	130 000 t

Tab. 2 Produktion an Kieserzen der Gruben im Testgebiet, Mitteilung der Ca. Tharsis S.A.

2.4.2. Kieserze

SCHERMERHORN (1971/2) führte angesichts der Ausdehnung und Reinheit der Pyriterzkörper den Begriff "Pyritit" für den SW-iberischen Kiesgürtel ein. Dieser Vorschlag gibt schon eine Vorstellung von der petrographischen Bedeutung dieser Erzgesteine. Da PINEDO VARA (1963) und STRAUSS (1965) bereits in hervorragender Weise die Kieserze, ihre Eigenschaften und Vorkommen detailliert vorstellten, soll im Folgenden eine zusammenfassende und knappe Übersicht auch über neue Arbeiten gegeben werden. Die Erze aller Lagerstätten im Pyritgürtel sind sich im wesentlichen ähnlich, deshalb sollen auch solche außerhalb des eigentlichen Testgebiets berücksichtigt werden.

2.4.2.1. Stoffbestand und Struktur der Erzkörper

Alle Pyritvorkommen zählen zu dem von HUTCHINSON (1973) definierten Pb-Zn-Cu-Ag Typ, den er als typisch für phanerozoische Verhältnisse mit bereits weitgehend differenzierter Kruste ansieht. STRAUSS (1965) wies ausdrücklich auf den polymetallischen Charakter der Erze hin und stellte sie in eine Reihe mit den häufigen, synsedimentär-exhalativen Lagerstätten eugeosynklinaler Entstehung.

Betrachtet man die am Aufbau der Erzkörper beteiligten Erzminerale, so sei eine Bestimmung für Erze wichtiger Gruben zusammen mit häufiger auftretenden Elementen (Tab.3,S.45) angegeben. DOETSCH (1957) veröffentlichte eine Analyse von Spurenelementen des Fördergutes von Herrerias.

Mineralbestand SW-iberischer Kieserze (Erzminerale):	
Pyrit	FeS_2
Kupferkies	$CuFeS_2$
Bleiglanz	PbS
Zinkblende	ZnS
Markasit	FeS_2
Magnetkies	FeS
Arsenkies	FeAsS
Sb-Fahlerz	$Cu_3Sb_2S_6$
Bournonit	$CuPbSbS_3$
Jamesonit	$Pb_4FeSb_6S_{14}$
Wolfsbergit	$CuSbS_2$
Enargit	Cu_3AsS_4
Famatinit	Cu_3SbS_4
Luzonit	Cu_3AsS_4
Whitneyit	Cu_9As
Umangit	Cu_3Se_2
Hauchecornit	$(Ni,Co)_9(Bi,Sb)_2S_8$
Co-Nickelkiese	$(Co,Ni)_3S_4$
Kobaltglanz	CoAsS
Gersdorffit	NiAsS
Ullmanit	NiSbS
Safflorit	$CoAs_2$
Rammelsbergit	$NiAs_2$
Löllingit	$FeAs_2$
Speiskobalt	$CoAs_3$
Rotnickelkies	NiAs
Wismutglanz	Bi_2S_3
ged. Wismut	Bi
ged. Gold	Au
Magnetit	Fe_3O_4
u.a.	

Durchschnittsgehalte SW-iberischer Kieserze (nach Analysen repräsentativer Fördererze):

ELEMENT	PYRITERZE (mass.Kieserze)[1]	MELIERTERZE[2]
Fe	40,0-46,0%	10,0-40,0%
Cu	0,2- 1,5%	0,1-14,0%
Pb	0,1- 3,0%	0,2-20,0%
Zn	0,2- 5,0%	1,0-32,0%
Co	0,01-0,1%	0,06-0,15%
Ni	0,001-0,01%	0,005-0,02%
S	45,0-51,0%	21,0-45,0%
As	0,1- 0,8%	0,1- 3,0%
Sb	0,02-0,1%	0,01-0,2%
Mn	0,01-0,1%	0,1- 0,7%
Si(als SiO_2)	0,2- 6,0%	0,1-40,0%
Al(als Al_2O_3)	0,1- 3,0%	0,1-15,0%
Ba(als BaO)	0,05-5,0%	0,05-26,0%

1) Fördererze der Gruben: Rio Tinto, Tharsis, La Zarza, Perrunal, S.Telmo, Herrerias, Lomero-P., Aznalcollar, P.de Hierro, La Joya, S.Platon, El Carpio, Campanario, S.Domingos, Aljustrel, Lousal, Caveira

2) Fördererze der Gruben: S.Telmo, M.Romero, La Joya, Aqu.Tenidas, S.Platon, Campanario, Lomero, Sotiel, Lousal, Caveira

Spurenelementgehalte der Kieserze von Herrerias (repräsen

Ru	0,04 g/t
Rh	0,04 g/t
Pd	0,2 g/t
Te	10,0 g/t
Os	0,08 g/t
Pt	0,1 g/t
Ir	Spuren

Tab.3 Erzminerale, Elementbestand und Spurenelemente nach STRAUSS (1965) und DOETSCH (1957) für Erze des Kiesgürtels

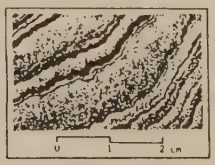
STRAUSS (1965) charakterisierte Mineral- und Elementbestand: "Die einzelnen Erzsorten einer Grube, wie auch die Gesamtheit der Primärerze aller SW-iberischen Kieslagerstätten weisen einen annähernd gleichen Mineralbestand auf. Der Erzinhalt einzelner Lagerstätten wie verschiedener Erzsorten unterscheidet sich weniger durch qualitative Wechsel im Mineralbestand als vor allem durch das Vorherrschen bzw. Zurücktreten einzelner Erzminerale oder Lagerarten." und:
"Einzelne Erzsorten verschiedener Lagerstätten weisen alle einen gleichartigen Elementbestand auf und unterscheiden sich nur im Mengenanteil einzelner Elemente bzw. Elementgruppen."
Sowohl in Fazies und Stoffbestand lassen sich drei wichtige Erzsorten aushalten, es sind dies die Pb-,Zn-reichen, relativ S-armen, oft gebänderten "Melierterze", die immer stratiform oder resedimentiert Nebengestein als Gangart führen; dann die Cu-reichen "Kupferpyriterze" (1-3%), sie zeigen geringe S - Gehalte, haben oft Quarz als Gangart und führen Calcit. Kaum sedimentäre Strukturen zeigen die buntmetallärmeren "massiven Pyriterze", sie

dominieren mengenmäßig im Kiesgürtel. PINEDO VARA (1963) und STRAUSS (1965) unterscheiden noch wesentlich detaillierter, als wichtige Fördererze spielen jedoch nur massive Pyrite und Kupferpyriterz eine Rolle, in untergeordnetem Ausmaß Melierterze und selten auch Armerze (wenig S, nur mittlere Cu,Pb,Zn, viel Gangart), soggenannte "azufrones".
Pb, Zn-reichere Erze treten entgegen einem verbreiteten Muster nicht hangend, sondern eher in den basalen Teilen der Erzkörper auf. Kupferpyriterz ist in größeren Konzentrationen in "stockworks" zu finden (La Zarza, Corvo, San Dionisio u.a.), wo es ausgesprochene Cu - Erzkörper bilden kann. Im massiven Pyrit und im gebänderten Typus dagegen scheint es bei vielen Vorkommen weder hangend noch liegend angereichert. Am Erzkörper von La Zarza konnte neuerdings eine deutliche räumliche Zonierung von Anreicherungen der Elemente Cu→Pb,Zn→Ag,Au→As vom Liegenden ins Hangende festgestellt werden, entsprechend ihrer relativen Mobilität in hydrothermalen Systemen (pers. Mitteilung R.D.Luethe, Chevron Resources).
Interessant erscheint für einen möglichen magnetischen Nachweis das Auftreten von Magnetkies in manchen Erzen. Dabei werden Gehalte bis 20% erreicht (Cueva de la Mora, nach PINEDO VARA, 1963). Allgemein aber scheinen höhere Anteile von Magnetkies an eine Sonderfazies gebunden, dies wird verdeutlicht durch das Auftreten mit Melierterzen und an stärkerer Karbonatführung (STRAUSS, 1965). Magnetit tritt sehr selten auf.
Sekundäre Vererzungen (Mobilisate) sind selten und dann eng an die primären Erze gebunden, sie unterscheiden sich weder im Mineral- noch im Stoffbestand wesentlich.
Die Fördererze haben relativ konstante Σ- Gehalte für Cu,Pb,Zn von 1,5 bis 2,5 %. Das Verhältnis Pb/Zn zeigt sich ebenfalls gleichmäßig mit 1:2. Kennzeichnend sind relativ hohe As- bei deutlich geringeren Sb - Werten. Die Co/Ni - Verhältnisse bewegen sich zwischen 2 und 10, erreichen aber auch Werte bis 18 (STRAUSS et al.,1981). Für die Exploration bedeutsam sind die relativ hohen Hg - Gehalte von 10 bis 200 ppm, verglichen etwa mit denen der präkambrischen kanadischen Kiesvorkommen von 2 bis 20 ppm.

Eines der wichtigsten Argumente für eine synsedimentäre Entstehung sind die zahlreichen sedimentären Strukturen. Sie werden von vielen Autoren beschrieben, STRAUSS (1965) demonstrierte eine große Vielfalt:

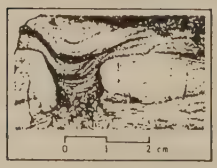
--- sedimentäre Wechsellagerungen Erz/Nebengestein (Abb.26a)
--- polare Anlagerungsgefüge (Abb.26c)
--- gradierte, gekräuselte Schichtung (Abb.26a,c)
--- Fließschichtung, gravitative Fältelungen
--- geopetale Füllungen (Abb.26c)
--- Resedimente (oft mehrere Generationen) (Abb.26b)
--- Gelgefüge, Onkoide
--- vererzte Bakterien, "Brombeerstrukturen"

In den aktiven Gruben des Untersuchungsgebietes dominieren massive Pyrite, die nur an wenigen Stellen sedimentäre Strukturen deutlich erkennen lassen. Die Melierterze sind zwar in allen Erzlagern vorhanden, treten aber lokal oft zurück. Sie zeigen bevorzugt die sedimentären Strukturen (Abb. 26a,b,c).



a Pyriterz von Planes-San Antonio (Rio Tinto) nach WILLIAMS et al. (1975)
schwarz: silifizierte Aschenlagen, weiss: Pyrit mit Cu, Zn, Pb-Sulfiden
Beachte Schichtung, Gradierung und sedimentäre Kräuselung

b Pyriterz von Filon Norte (Tharsis), "carbonate pyrite"
schwarz: Zinkblende, Bleiglanz, Siderit, weiss: reiner Pyrit, Quarz
Beachte kantige Resedimente teilweise 2.Generation, Bruchstücke von gebändertem Erz



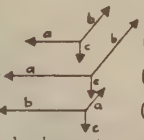
c Pyriterz der Grube Lousal (SW-Portugal) nach STRAUSS (1965)
schwarz: "Melierterz" (Pb, Zn-reicher Pyrit)
weiss: massiver reiner Pyrit
Beachte Geopetalfüllung, Anlagerungsgefüge, Fein- und Kreuzschichtung

Abb.26 Sedimentäre Strukturen im Kieserz verschiedener Gruben

Selbst im massiven Pyrit sind manchmal aus seiner Kleinklüftung heraus noch ehemalige Sedimentationsflächen erkennbar. ac- und bc-Klüfte eines fundamentalen Kluftsystems (BOCK, 1980) streuen häufiger und lassen die ebenfalls als Trennflächen ausgebildeten ss als parallele Schar erscheinen.

Abb.27
Sedimentationsflächen und fundamentales Kluftsystem im massiven Pyrit, Tharsis, Filon Norte 8. Sohle, zentraler Teil, Blickrichtung ist SW

Die geometrische Form der im gesamten Kiesgürtel vorkommenden Erzkörper läßt sich allgemein als linsen- bis zigarrenförmig bezeichnen, wobei zumindest eine lange Achse im Streichen der umgebenden Serien liegt und die kürzeste die stratigraphische Abfolge dokumentiert. Die B - Achsen der Hauptdeformation fallen fast immer mit einer längeren Achse zusammen. Alle Erzkörper zeigen Spitzenbildung, d.h. sie dünnen lateral allmählich aus und werden dadurch nicht mehr bauwürdig. Dies gilt auch als Hinweis auf ihre sedimentäre Entstehung. STRAUSS (1965) kategorisierte am Beispiel Lousal's drei Grundtypen:

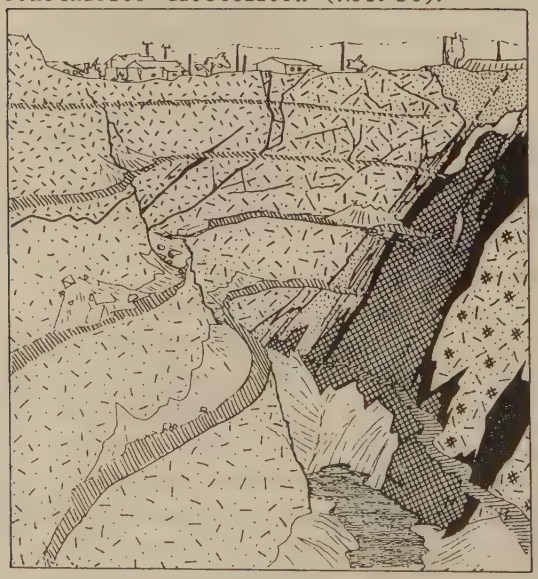
--- linsenförmige Körper  (a≅b> c)

--- plattenförmige Körper (a≅b>>c)

--- zylindrische Körper (a≅c<<b)

Betrachtet man einen Querschnitt der bekannten Erzkörper im Pyritgürtel, so können unter Einbeziehung eines komplexen Typs, dessen Grundform durch intensive Tektonik nicht mehr erkennbar ist, alle auftretenden Formen mit diesem Modell erklärt werden. Einige Vorkommen zeigen synklinale Verfaltungen, so daß ihre ursprüngliche Form erst nach einer Glättung ermittelt werden kann (San Dionisio, La Zarza). Viele Kiesvorkommen sind im Generalstreichen in Zügen angeordnet, so daß bei identischer Lithologie im Liegenden und Hangenden ein stratigraphisches Niveau der Ablagerung wahrscheinlich ist. Im Profil zeigen sie neben langsamer

sukzessiver Vertaubung im Gegensatz zu ihrem lateralen Verhalten auch scharfe Übergänge zu den Hangend- und Liegendserien, die nicht immer tektonisch begründet sind (s.Abb. 29, S. 50a).
Waren die oberflächennahen Erze oxidierenden Bedingungen ausgesetzt, so entwickelten sich z.T. riesige Hutzonen, engl. gossan. Die Tiefe der Oxidationszone hängt dabei von der tektonischen Zerrüttung, der topographischen Lage und dem Nebengestein ab. Durchschnittlich gelten 30 - 60 m. Cerro Colorado bei Rio Tinto und Filon Sur bei Tharsis sind eindrucksvolle Beispiele solch tiefgreifender Umsetzung. In diesen, lange Zeit Wasser und Luftsauerstoff ausgesetzten Erzen ließ ein selektiver Stofftransport Bunt- und Edelmetallanreicherungen entstehen. An der Oberfläche sind Hämatit (Fe_2O_3), Goethit (α-FeOOH) + Lepidokrokit (γ-FeOOH) = Limonit, Jarosit ($KFe_3(OH)_6/(SO_4)_2$) mit ihren gelb- bis rotbraunen Farben Hinweise für umgesetztes sulfidisches Erz. Seltener megaskopisch sichtbar treten Cu - Minerale wie Malachit ($Cu_2(OH)_2/CO_3$) und Azurit ($Cu_3(OH/CO_3)_2$) auf. Charakteristisch sind im unmittelbaren Kontakt Nebengestein/Sulfide reinweisse, durch die bei der Oxidation des Pyrits entstehende Schwefelsäure gebleichte tonige Gesteine, die ursprünglich Tuffe und schwarze Tonschiefer darstellten (Abb. 28).



Kieserz
schw. Tonschiefer
gebleichte Tonsch.
oxidierte Serien "Gossan"
chloritisierte Tuffe u. Tonsch.
chlorit., vererzte Tuffe u. Tonsch.
meta-Basalte Spilite
Schutt
Trassierung

10 20 m

Abb.28 Aufgelassener Tagebau Sierra Bullones (S Tharsis, Blick nach ENE)

2.4.2.2. Nebengestein

Hier soll nur das unmittelbare Nebengestein der Kieserze betrachtet werden und seine Beziehungen zu den Erzen. Alle Serien, die signifikant im Kontakt zum Erz auftreten kann man in ihrer Gesamtheit mit dem Erz als Erzfazies bezeichnen, sie müssen nicht zwingend bauwürdige Erzvorkommen führen, zeigen aber immer gegenüber dem regionalen Hintergrund erhöhte Sulfidgehalte.
Abb.29, S. 50a gibt eine Übersicht über den schematischen geologischen Bau und Nebengestein wirtschaftlich wichtiger Kieserzkörper im Pyritgürtel und kleinerer Vorkommen im Untersuchungsgebiet und seiner unmittelbaren Umgebung. Folgende Serien dominieren mit abnehmender Signifikanz in der Nähe der Erze:

--- Schwarze Tonschiefer (Pyrit-führend) als Saumserie im unmittelbaren Kontakt oder als Zwischenmittel. Oft geringmächtig (m - 10er m) und oberflächennah zu weissen, weichen Tonen zersetzt.

--- Mächtige rhyolitische bzw. dazitische meta - Vulkanite (oft Pyrit-führend) bilden das Liegende.

--- Verkieselte Tuffe ("silicado") im Liegenden, bunte Tonschiefer, z.T. stärker mit Cu mineralisiert finden sich meist im unmittelbar Liegenden. Wirtsgestein der "stockworks" von La Zarza, San Dionisio, Neves-Corvo u.a.

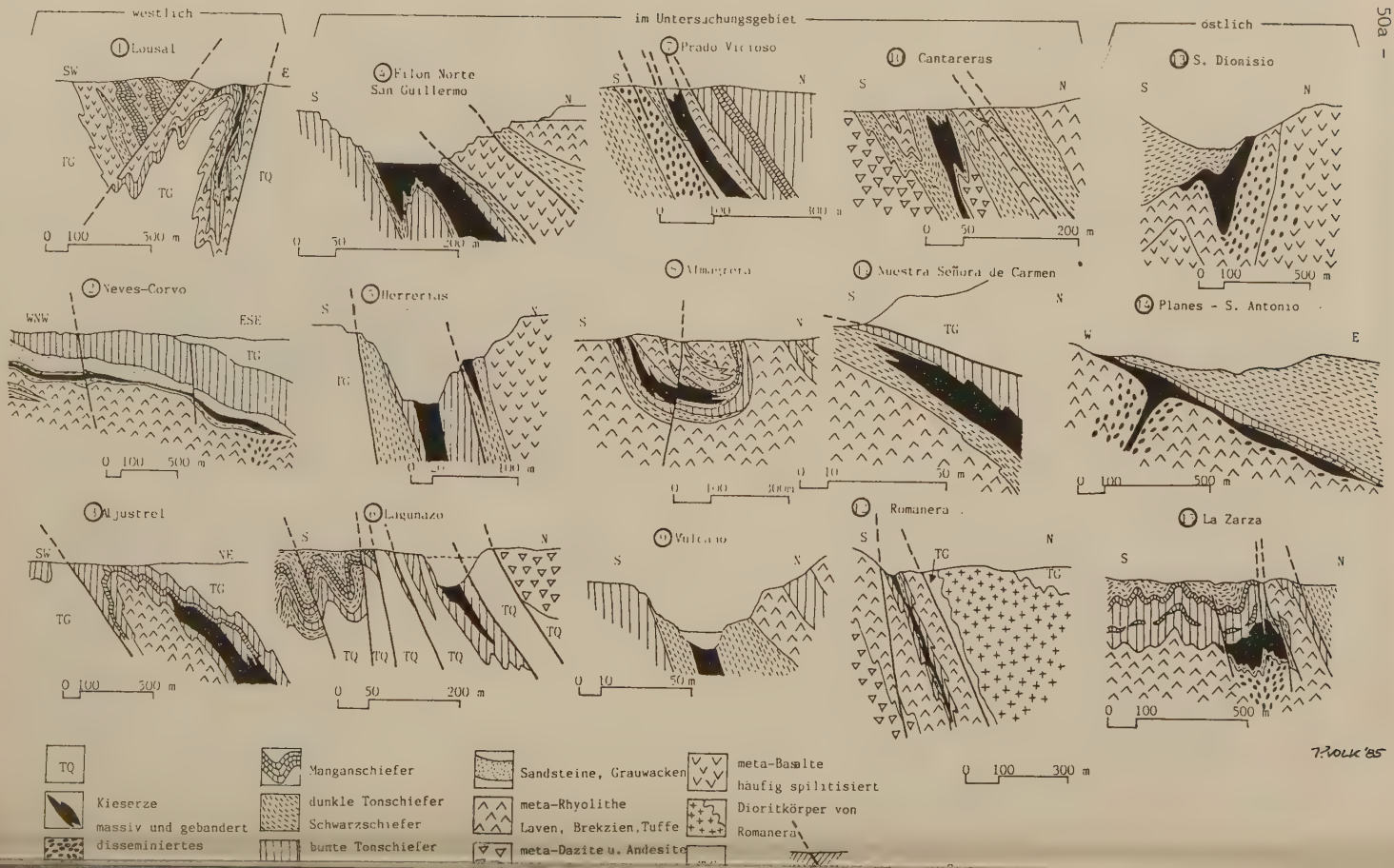
--- Dunkle Karbonatbänke (Siderit, Dolomit) mit m-Mächtigkeit sind in einigen Fällen häufig. Dort kommen sie unmittelbar im Kontakt zum Erz, als Zwischenmittel und diffus verteilt vor.

--- Basaltische meta - Vulkanite (als spilitisierte Gesteine mit reliktischen pillows, manchmal Pyrit-führend) treten konkordant als 10 - 100 m mächtige Serien in unmittelbarer Umgebung einiger Vorkommen auf, so in Tharsis, Herrerias, San Dionisio u.a.

Rhyolithische und dazitische vulkanische Brekzien nahe wirtschaftlichen Vorkommen scheinen in genetischem Zusammenhang zu den hydrothermalen Prozessen der Erzbildung zu stehen. STRAUSS et al. (1977) betonen, daß im Falle mehrerer vulkanischer Zyklen nur der erste im Sinn wirtschaftlicher Vererzungen produktiv ist. Eine solche Einordnung muß aber in jedem Fall auf das jeweilige Untersuchungsgebiet, also die nähere Umgebung einer bekannten Abfolge beschränkt bleiben, da durch das Auftreten der Vulkanite in lokal begrenzten Stöcken ohne weit parallisierbare Zusammen-

Abb. 29 ÜBERSICHT ÜBER AUFBAU UND NEBENGESTEIN EINIGER KIESLAGERSTÄTTEN DES SUBIBERISCHEN KIESGÜRTELS

QUELLEN: STRAUSS et al.(1974): 1 4 6 ; WILLIAMS et al.(1975): 14 ; SALPETEUR(1976): 11 12 ; STRAUSS et al.(1977): 7 8 10 13 ; Eigene Aufnahme: 5 9 ; Unterlagen und Pläne der CA. THARSIS S.A.: 2 3 1 .



hänge das generelle Ausscheiden günstiger Explorationsniveaus nicht eindeutig ist. Es ist im Pyritgürtel eine allgemeine Erfahrung, daß entlang sogenannter "vulkanischer Lineamente", d.h. einer linearen Anordnung von vermuteten Eruptionszentren, mittelbar größere Erzmassen auftreten. Die weit aushaltende Mn - Schieferfazies ist oftmals ein leicht im Gelände zu erkennender Anzeiger für zentral liegende Erzfazies, diese Zonierung ist in der größeren Mobilität des Mn^{2+} gegenüber Fe^{3+} im marinen Milieu begründet. MEYLAN (1981) berichtet über solche Verhältnisse in vergleichbaren Kieslagerstätten. Im Nebengestein ist in einigen Fällen eine deutliche Mineralneubildung sichtbar, deren bis zu mehrere 100 m breite Höfe mit starker Serizitisierung für die Exploration genutzt werden können (CABALLERO et al.1975, WILLIAMS et al.1975). Eigene Geländearbeiten bestätigen lediglich ein häufigeres Auftreten in VK - Serien, eine signifikante Serizitisierung in unmittelbarer Nähe der Erzfazies konnte nicht festgestellt werden. Ob die Neusprossung synsedimentär oder erst während der Hauptdeformation rings um die kompetenten Erze in der Druckfront entstand, spielt für die Exploration nur eine geringe Rolle.

Wichtiger scheint mir das Auftreten K-reicher, leukokrater meta - Vulkanite in näherer Umgebung der Erzfazies ($K_2O>Na_2O$), wie sie KERSABIEC&ROGER (1976) für das Gebiet zwischen Tharsis, Cabezas Rubias und Calanas feststellten. Für Tharsis und S Paymogo konnten eigene Geländearbeiten die Existenz solcher Laven mit hohem Anteil an Orthoklas und/oder starker Serizitführung nachweisen, dies in unmittelbarer Nähe zu produktiver Erzfazies. Alle anderen Vulkanite zeigen einen deutlich geringeren K_2O - Gehalt.

Geochemisch signifikante Aureolen von Spurenelementen sind im allgemeinen wenig ausgeprägt. Hg hat wohl noch die ausgeprägteste Migrationsfähigkeit; Cu,Zn,Pb,V,Mg und andere anomale Zonierungen sind unsicher, und wenn vorhanden immer nur recht kleinräumig nachweisbar (STRAUSS et al., 1981).

Ein tektonischer Hinweis ist an Abb.29 S.50a zu erkennen, eine Häufung von Aufschiebungen, ja ganze Störungsbündel begrenzen oftmals die kompetenten Erzlager. Dadurch ergibt sich auch in unmittelbarer Nähe der Erze eine starke Diversität der Lithologie senkrecht zum Streichen.

2.4.3. Andere Vererzungen

Ausschließlich an die Manganschieferfazies gebunden sind besonders bei größeren Mächtigkeiten lokale Vorkommen von oxidischem, bauwürdigem Manganerz. Diese kleinen bis kleinsten Körper wurden vor allem zu Beginn des Jahrhunderts beschürft. Ein einziges bei La Isabel ist bis in die sechziger Jahre betrieben worden. Heute wird im Pyritgürtel kein Mangan mehr gebaut.
Manganspat und Rhodonit in gebänderten kieseligen Gesteinen bilden das Primärerz, das durch oberflächennahe oxidative Prozesse in etwa 20 - 30 m mächtige Pyrolusit und Psilomelanbildungen umgewandelt wurde.
Wirtschaftlich absolut unbedeutend waren und sind syngenetische Vorkommen als auch epigenetische Gänge, die Sb (Neron, N Tharsis) und Pb (Dedi, Maria Cristina, S La Isabel) enthalten. Bei Herrerias treten geringe Mengen eines karbonatischen Cu - Erzes auf, es handelt sich dabei um Reste einer fossilen, erodierten Hutbildung über Kieserzen.

2.4.4. Betrachtungen zur Genese der Erze

Die SW-iberischen Kieserze und die mit ihnen verbundenen Mangan-, Antimon-, Bleiglanz- und im N vermehrt auftretenden Roteisenvererzungen werden heute weitgehend unwidersprochen als vulkanosedimentäre, syngenetische und untermeerische Bildungen akzeptiert. Sehr viele geologische Beobachtungen an den Vorkommen lassen sich damit zwanglos erklären:

--- Form der Erzkörper
--- Innerer Aufbau
--- Sedimentäre Strukturen im Erz
--- Nebengestein
--- Schichtgebundenes Auftreten

um nur die wichtigsten zu nennen. Eine Reihe von Unsicherheiten bleiben doch bestehen, sie haben ihre Ursache zumindest teilweise in ungenauen Vorstellungen über die Bildungsbedingungen von Erzlagern in mittleren bis großen Meerestiefen. Es soll versucht werden einige Gedanken zu formulieren, die sich an neueren Ergebnissen der Meeresgeologie (speziell: sich bildender Erzschlämme) orientieren. Beabsichtigt ist dabei, geologische Verhältnisse der SW-iberischen Kieslager verständlicher zu machen und genetische Zusammenhänge aufzuzeigen.

Zahlreiche untermeerische Vorkommen von Erzschlämmen hydrothermaler Entstehung sind heute bekannt. Zu ersten intensiven Forschungsarbeiten führten die Entdeckung hochsalinarer Deposite im Riftbereich des Roten Meeres (DEGENS&ROSS 1969, BÄCKER&RICHTER 1973, WEBER-DIEFFENBACH 1976). Die rezente Bildung von sulfidischen Sedimenten an zahlreichen Stellen des Pazifik, bevorzugt in der Nähe der Riftachsen, ist eines der wichtigsten Ergebnisse moderner Tiefseeforschung. Solche Beobachtungen bestätigen, daß hydrothermale Prozesse am Meeresboden keine seltene Ausnahme sind, sondern ein wichtiges Regulativ in der Wärmebilanz und im chemischen Stoffaustausch innerhalb vulkanisch aktiver Krustenbereiche darstellen (BISCHOFF&DICKSON 1975, EDMOND et al. 1982, HEKINIAN 1982, EDMOND&DAMM 1984).

BÄCKER&RICHTER fanden in einem Vergleich des Elementinhaltes rezenter und fossiler, hydrothermal-sedimentärer Erzbildungen eine weitgehende Homogenität: Fe, Mn, Zn, Cu, Si, Ba, Pb, As und Ag treten in wechselnden Anteilen immer wieder auf. Betrachtet man ihre Zusammenstellung einiger Vorkommen, so fällt die weitgehende Unabhängigkeit in der Qualität der Metallführung vom Chemismus der Vulkanite und der Ablagerungstiefe auf. Dies kann bedeuten, daß der zugehörige Vulkanismus in erster Linie nur die Energie für ein hydrothermales, untermeerisches System liefert. Die geförderten Metalle werden dann durch die extrem reaktionsfähigen, unter Oberflächenbedingungen überkritischen Lösungen aus verschiedenen Wirtsgesteinen mit z.T. geringen Ausgangsgehalten extrahiert und angereichert. Zwischen der aktiven Sulfidförderung etwa im Südpazifik mit ihrer grundsätzlich basaltischen "Umgebung" in einer geotektonisch völlig andersartigen Lage und den geologischen Befunden im SW-iberischen Kiesgürtel gibt es dennoch eine ganze Reihe Entsprechungen.

So zeigen sich um die eigentlichen Erzbringer ("black smokers" und diffuse Aufstiegswege) thermale Anomalien im Meerwasser, die zusammen mit kräftigem Sulfidangebot die Lebensgrundlage für dichte Bakterienrasen und eine darauf aufbauende höhere Lebensgemeinschaft sind. Diese "Schwefelbakterien" beziehen ihre Energie aus der Oxidation des Sulfid - Ions (S^{2-}) zum Sulfat (SO_4^{2-}) und sind ansonsten autark. So entstehen scharf begrenzte Halos von an organischen Bestandteilen reichem Sediment in einer ansonsten C-armen pelagischen Fazies. An einigen Stellen wurde sogar eine durch den erhöhten Wärmefluß geförderte Paraffinisierung der

organischen Substanz beobachtet (EDMOND et al.1982). Überträgt man unter Vorbehalt diese Befunde auf die Verhältnisse in SW - Spanien, so erklären sich die Erzkörper dicht umkleidenden, bituminösen Schwarzschiefer (s.Abb. 28 S. 49) nicht als Ursache sondern als Folge der Sulfidemissionen. Starke Sapropelentstehung so geringer Ausdehnung läßt sich schwerlich mit Sonderbecken erklären, während in geringem lateralem Abstand wieder oxidierende Bedingungen herrschten.
FRANCHETEAU et al.(1979) berichten außerdem von stabilen, mächtigen Sulfidsedimenten direkt am Abhang unterhalb eines Seamount - Gipfels, in einer Position also, die dem Bild einer "morphologischen Falle" entgegensteht (vgl. SCHERMERHORN 1971/2). STRAUSS et al. (1977) beschreibt eine Bindung vieler Erzlager an synklinale Strukturen. Dies muß nicht als Voraussetzung für die Entstehung, sondern kann durchaus auch als Folge des kompetenten Verhaltens bei späteren Deformationen angesehen werden. Bei Erzen, die zum größten Teil resedimentiert sind, liegt dagegen ein sedimentärer Transport als Trübestrom in kleine Depressionen nahe.
Ein Problem stellt bis heute die Seltenheit eindeutiger Zufuhrkanäle, sogenannter "pipes" dar. An einigen Vorkommen (La Zarza, San Dionisio, Corvo) lassen sich vererzte und stark silikatische Liegendserien als mögliche, diffuse Zufuhrwege deuten. Lediglich in der Planes - San Antonio Mine (Rio Tinto) konnte ein senkrecht zur schichtorientierten Erstreckung des Hauptlagers ein mit massivem Pyrit mineralisierter Zufuhrkanal mit nach außen abnehmender Vererzung nachgewiesen werden (Abb.29 S.50a). Die Mehrzahl aller Pyritlager zeigt aber im Liegenden keine mineralisierten Aufstiegswege für Erzlösungen. Dies muß nicht unbedingt ein Zeichen ihrer Allochthonie sein, wie von SCHERMERHORN (1971/2) vermutet, besonders dann, wenn selten Resedimente nachzuweisen sind. BISCHOFF&DICKSON (1975) zeigten, daß Aufstiegswege nur dann mineralisierten und somit fossil erkennbar werden, wenn das Lösungsgleichgewicht der gesättigten, überkritischen Lösungen durch Zutritt von kaltem Meerwasser während des Aufstiegs gestört wird. Sie beobachteten aber viele geschlossene Systeme, deren Metallfracht erst beim Austritt ins freie Meerwasser quantitativ ausfällt und die daher fossil nicht mehr nachzuweisen wären (Abb.30 S. 55).
Ihre Untersuchungen ergaben auch eine positive Mg - Anomalie im Wirtsgestein, Analoges fanden STRAUSS et al. (1981) für das

Nebengestein der Pyriterzes von La Zarza. Immer wieder auftretende Sideritbänke in den Erzen (z.B. Filon Norte, Lousal) lassen sich zwanglos erklären, nimmt man die unmittelbare Nähe zu einem CO_2-fördernden, hydrothermalen Feld an. Diffuses Auftreten von Karbonaten im Erz ("carbonate pyrite" im Filon Norte) könnte ein Zeichen fortgesetzter CO_2 - Entgasung in das noch nicht verfestigte Erzsediment sein. Bei größeren Abständen zum Gasaustritt wäre allerdings der nötige p_{CO_2} im Meerwasser zu gering für die Bildung von Karbonaten; eine Erklärung für die stockförmige Entwicklung des diffusen Karbonaterzes und das geringe laterale Aushalten der Karbonatbänke. Selbst bei den basischen Wirtsgesteinen der rezent beobachteten "black smokers" ergab sich ein hoher SiO_2 - Gehalt in den Lösungen, so daß die verkieselten Liegendserien der Erze im Pyritgürtel ("silicado") und die lateral anschließende, stark silikatische Manganschieferfazies das fossile Äquivalent darstellen könnte.

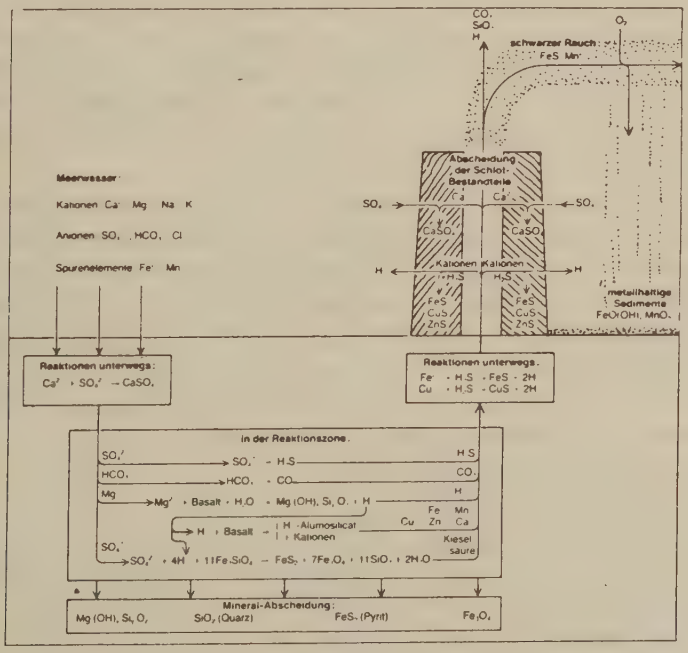


Abb.30 Stoffumsätze bei hydrothermalen Systemen nach EDMOND&DAMM (1983) Interaktion zwischen thermisch aktiviertem Meerwasser und Basalt

2.4.5. Aktuelle Exploration

Da fast alle oberflächennahen Anzeiger von Erzen (Hutminerale, "gossan") schon während der letzten Jahrtausende beschürft wurden, sind heute Methoden gefragt, die Informationen aus größerer Teufe liefern. Die vor allem in Bereichen präkambrischer Schilde erfolgreich eingesetzten geophysikalischen Flugmessungen blieben bisher im Kiesgürtel ohne Erfolg. Dies liegt sicher zum Teil an den physikalischen Gegebenheiten im Pyritgürtel und den methodischen Grenzen der Verfahren, zum anderen aber auch an den länger zurückliegenden Versuchen mit Störsignal - empfindlichem Gerät (Hunting 1957,1959,Lundberg 1957,Seigel 1967,Geoterrex 1973; nach STRAUSS et al.1977). Eine Helikopter - Befliegung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit verschiedenen Messverfahren wurde bisher noch nicht ausgewertet, ihre geophysikalischen Daten bilden einen Teil dieser Untersuchungen.
Geophysikalische Bodenmethoden werden infolge hoher Flächenkosten trotz guter Ergebnisse nicht für die Übersichtsexploration eingesetzt. Erfolgreiche Methoden für kleine Gebiete von wenigen 10er km^2 Größe sind dabei Gravimetrie, Geoelektrik, Mise a la Masse und die Hg - Szintillometrie. Letztere wurde nach erfolgreichen Tests von der Ca. Tharsis S.A. vor kurzem flächendeckend in einem Teil ihres Konzessionsgebietes eingesetzt. Die Ergebnisse konnten jedoch hier nicht mehr berücksichtigt werden.
Geochemie spielt in der Exploration keine dominierende Rolle, verursachte doch jahrtausendealte Bergbautätigkeit eine fast allgegenwärtige anthropogene Umlagerung und Verschleppung von Erz- und Haldenmaterialien. Geologische Methoden werden als unterstützende Maßnahmen immer wichtiger. Diamant - Kernbohrungen sind als Explorationsmittel nur in der Umgebung aktiver und auflässiger Abbaue eingesetzt. Zur Zeit (1984) werden im Untersuchungsgebiet Explorationsarbeiten durchgeführt auf:

--- Cu-reiche Kiese (SW Paymogo)
--- polymetallische Kiese (W Cabezas Rubias)
--- polymetallische Kiese (N Puebla de Guzman)
--- Edelmetalle in Huterzen und Abraum (La Lapilla, Tharsis

In Teilen des Testgebiets wird mit der Hg - Scintillometrie allgemein auf größere Kieslager exploriert.

2.5. Geologische Ansätze für die Exploration auf Kieserze

Aus den vorangegangenen Betrachtungen folgen viele, prinzipiell mögliche Ansätze für eine Explorationsarbeit. Die meisten können jedoch in wirtschaftlich vertretbarem Ausmaß nur für kleine Areale durchgeführt werden und sind für eine Übersichtsexploration zur Festlegung von Gebieten für detailliertere Aufnahmen kaum geeignet. Da diese Arbeit sich in erster Linie mit dem Problem einer effektiveren Übersichtsexploration an Hand von Flächendaten beschäftigen soll, sollen hier vor allem Ansätze Berücksichtigung finden, die im lokalen Maßstab Hinweise auf höffige Bereiche geben. Grundsätzlich werden alle Maßnahmen davon ausgehen, Gebiete im anstehenden VK und unter flacher TG - Bedeckung (bis etwa 100 m) zu lokalisieren, die eine anschließende Detailbearbeitung sinnvoll erscheinen lassen. Aus dem Vorangegangenen ergeben sich für eine Übersichtsexploration als mögliche Kriterien:

--- Größere rhyolitische bis dazitische Vulkanitkörper, auch als vulkanische Lineamente, deutliche Kaliumanomalien
--- Tuff- und Tonschieferfolgen, die solche Vulkanitstöcke umgeben (konzentrische Strukturlinien, auch unter flacher Bedeckung)
--- Kleinräumig abwechslungsreiche Lithologie nahe Vulkaniten
--- Lokal hohe Strukturdichten (ss, sf, Aufschiebungen)
--- Oberflächennahe Mineralisationen (Gossan, Schürfe, Halden)
--- Laterale Kontakte zur Manganschieferfazies
--- Geringmächtige, stratiforme meta-Basalte (Spilite)
--- Fortsetzung des VK unter flache TG - Überdeckung

Für eine Schwerpunktsuntersuchung in großem Maßstab bieten sich an:

--- Schwarzschiefervorkommen
--- Bleichzonen
--- Kleinere synklinale Strukturen
--- Verkieselung von Tuffen und Tonschiefer ohne Mn - Führung
--- Hoher Gehalt an oxidischen Fe- und Cu - Hutmineralen

Speziell die Bleichzonen in Schwarzschiefern und Tuffen können dabei als Nachweis für vorhandene Kiesvererzungen gewertet werden. Neuerdings festgestellte Zonierungen erhöhter Gehalte an Bunt- und Edelmetallen in und nahe mancher massiver Kiese lassen sich bei detaillierten Untersuchungen an bekannten Vorkommen als Methode zur Erweiterung der Reserven etablieren (STRAUSS et al. 1981, pers. Mitteilung R.D.Luethe, Chevron Resources Inc.), für

eine Suche auf neue, nicht bekannte Vererzungen speziell in größerer Teufe werden sie durch ihre geringe Ausdehnug kaum eine Rolle spielen. Geochemische Aureolen im Nebengestein sind fast immer auf den direkten Kontakt zum Erz beschränkt. Die ausgeprägte ac-Tektonik der Kieserze im Gegensatz zur sf,bc-betonten Tektonik der umgebenden VK - Serien ist für Explorationszwecke im hier diskutierten Masstab nicht nutzbar. Durch die großen rheologischen Unterschiede zwischen kompetentem Erz und inkompetentem, unmittelbarem Nebengestein sind die typischen Gefügebilder nur auf die jeweiligen Serien beschränkt.

III. INFORMATIONSGEHALT DER FERNERKUNDUNGS- UND GEOPHYSIKALISCHEN DATENSÄTZE

Die Existenz verschiedenartiger geowissenschaftlicher Flächendaten (DS) erschwert und vereinfacht einem mit Explorationsaufgaben betrauten Geologen die Arbeit zugleich. Einerseits stehen oft eine Fülle von Messergebnissen zur Verfügung und es können aus einer großen Palette angewandter Verfahren vielversprechende Daten selektiert werden. Zum Anderen erfordert die Auswahl und Auswertung solcher Informationen die Kenntnis der methodischen Grundlagen, der Möglichkeiten und Grenzen in der Interpretation.
Im Folgenden soll der Versuch unternommen werden, die in dieser Arbeit verwendeten Meßverfahren kurz in ihren Grundlagen zu skizzieren. Außerdem werden Aussage und Grenzen unter Berücksichtigung der thematischen Bedeutung diskutiert. Abschließend zeigt eine Übersicht über alle hier in Betracht gezogenen Daten mögliche Auswahlkriterien und Möglichkeiten zur Informationsverdichtung. Die für die Suche nach Kieserzkörpern interessantesten Daten werden schließlich zusammengestellt und nach ihren Eigenschaften kategorisiert. Alle digital vorliegenden Datensätze wurden mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung untersucht, die in dem Softwarepaket SWING am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie verfügbar sind (Beschreibung SWING Kap.IV).

1. Problematik der Auswertung unterschiedlichster DS

Fast alle verwendeten Daten und Karten sind (in unterschiedlichem Ausmaß) Ergebnisse von Interpolationen zwischen Einzelmessungen. Dies ist nicht der Fall beim Luftbild, in geringem Ausmaß bei den Satellitenscannern. Die geophysikalischen Messungen erfolgen i.A. auf Linien senkrecht zu vermuteten Hauptstrukturrichtungen viel dichter als es dem Abstand der Messlinien untereinander entspricht. Schon diese Aufstellung für die flächenhafte Auflösung zeigt, daß nur eine Berücksichtigung der spezifischen Unterschiede brauchbare Ergebnisse liefern kann. Ähnliches gilt für eine mittlere Wirkungstiefe, die Signalauflösung, andere Parameter und schließlich allgemein den Aussagewert.

2. Datensätze und ihr Bezug zu Kiesvorkommen im Testgebiet

Für großflächige Explorationsprogramme wurden im Kiesgürtel geophysikalische und Fernerkundungsdaten nur marginal und mit geringem Erfolg benutzt (STRAUSS et al.1977, BANNINGER 1981, KOOPMANS 1984). Die wesentlich detaillierteren geophysikalischen Bodenverfahren, wie Gravimetrie, Geoelektrik, Hg - Scintillometrie lieferten oft signifikante Anomalien und führten zu einer beträchtlichen Erweiterung der bekannten Reserven.
Die großflächigen Messprogramme, sogenannte "blanket coverages", in der Größenordnung mehrerer 100 km^2 wurden bisher in ihren gängigen Verfahren noch nicht detailliert auf ihre Informationsgehalte für den Kiesgürtel hin untersucht. Es ist dies auch das erste Mal, daß

--- die gegenüber Flugzeugdaten wesentlich genaueren Helikoptermessungen
--- kombinierte elektromagnetische, magnetische und spektrometrische Daten
und --- hochauflösende Satellitendaten (Thematic Mapper)

für ein begrenztes Untersuchungsgebiet behandelt werden.

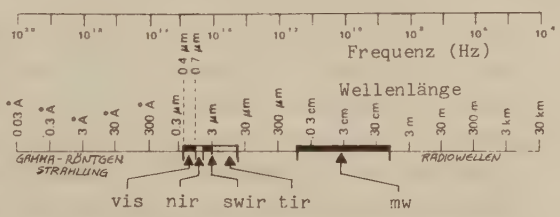
2.1. Fernerkundungsdaten

Unter Fernerkundung (FE) versteht man Methoden, die es erlauben, Informationen über entfernte Objekte zu erhalten ohne mit diesen direkt in Kontakt zu treten (engl. remote sensing). Daß viele geophysikalische Messverfahren, etwa die Magnetik, Elektromagnetik, Gravimetrie u.a. dieser Definition auch genügen, aber allgemein nicht als Methoden der FE angesehen werden, ist mehr in der historischen Entwicklung der FE zu sehen. Sie begann mit rein optisch-analogen Verfahren und war dadurch schon technisch von den Methoden der klassischen Geophysik weit entfernt. Digitale Technik sowohl in der Datenakquisition als auch -prozessierung und eine Ausweitung der Sensorik über einen weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums haben in den letzten Jahrzehnten eine methodische Annäherung bewirkt.
GREGORY (1977) gab eine aktuelle Definition des Begriffs remote sensing und sie sei für diese Arbeit dem deutschen Synonym Fernerkundung gleichgestellt:

"remote sensing denotes the aerospace practices of measuring the ultraviolet, visible, infrared and microwave radiations emitted and reflected from the surface of the earth and from the atmosphere."
"Fernerkundung steht für eine Luftraum- und Weltraumgebundene Messung von ultravioletter, sichtbarer, infraroter und Mikrowellen - Strahlung, die von Erde und Atmosphäre emittiert und reflektiert wird."
GOETZ et al. (1983) bestätigt diese Abgrenzung zu anderen Verfahren. Damit zählen etwa spektrometrische Messungen im Bereich der Gamma - Strahlung eindeutig zur Geophysik und werden unter diesem Punkt diskutiert.

Als geologisch potentiell interessante FE - Daten existierten zu Beginn dieser Untersuchungen (Jan.1984) für das Testgebiet:

- Landsat MSS (vis/nir)
- Landsat TM (vis/nir/ swir/tir)
- HCMM (vis/tir)
- SAR 580 (mw,X-Band)
- Metrische Kamera (vis/nir)
- IR-Luftbild (vis/nir)
- SW-Luftbild (vis)



vis = sichbares Licht, nir = nahes Infrarot
swir = mittleres Infrarot, tir = thermale Strahlung
mw = Mikrowellen (Radar)

Abb.31 Wichtige Bereiche der FE - Sensorik im elektromagnetischen Spektrum und ihre Bezeichnung, Abk. der Sensorsysteme werden im folgenden Text erläutert

Aus Gründen wie geringflächiger Bedeckung des Testgebiets, Qualität der Daten, Bewölkung, zu geringer räumlicher Auflösung und schließlich zu erwartender thematischer Bedeutung erschienen nur drei DS lohnend für eine weitere Bearbeitung und Einbeziehung in diese Arbeit.
So ist die 600 m Auflösung des Heat Capacity Mapping Mission (HCMM)- Satelliten für die zu untersuchenden lithologischen Strukturen und erst die Dimensionen der Erzfazies zu grob, um kleinere thermale Anomalien zu entdecken. Synthetic Aperture Radar (SAR) - Daten wurden bereits von KOOPMANS (1984) auf ihre Eignung für die geologische Nutzung im Bereich Tharsis - Rio

Tinto untersucht. Das Radarsignal zeigte keine Differenzierung der Lithologie, selbst in den offenen und abgedeckten Tagebauen war das Erz und Gossan vom Nebengestein nicht einmal andeutungsweise zu unterscheiden. Gegenüber Landsat MSS wiesen die SAR - Daten zwar eine erhöhte Strukturinterpretierbarkeit auf, ergaben aber dabei eine starke Beeinflußung durch Beleuchtungswinkel und Flugrichtung, so daß für Korrekturen aufwendige digitale Verfahren nötig wären. Da auch nur ein kleiner Teil des Testgebiets erfasst war und mit Landsat TM ausgezeichnete Strukturdaten zur Verfügung standen, erschien ein Verzicht auf die Radardaten gerechtfertigt. Die metrische Kamera an Bord des Space Shuttle zeichnete im Dezember 1983 lediglich eine fast geschlossene Wolkendecke über dem Testgebiet auf. Auf eine Einbeziehung der IR - Aerophotos wurde aus Gründen verzichtet, die in Kap.2.1.3., Luftbild, näher erläutert werden.

Eine der ersten in Europa verfügbaren Thematic Mapper (TM) - Szenen eröffnete die größten Aussichten für eine thematische Nutzung. MultiSpectral Scanner (MSS) - Daten waren bereits in unmittelbarer Umgebung als Datenquelle für Explorationszwecke erprobt worden (BANNINGER 1981, KOOPMANS 1984). Schwarz-Weiss Luftbilder empfehlen sich als bewährtes Medium in der Übersichts- und Detailexploration mit ihrer hohen räumlichen Auflösung und als aktuelle Orientierungsgrundlage.
Alle diese Daten resultieren aus der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und den obersten Mikrometern beobachteter Oberflächen und liefern so Informationen über den aktuellen Oberflächenzustand (Anstehendes Gestein, Böden, Vegetation u.a.). Bildverarbeitungs (BV) - Hardware und Software aller in diesem Abschnitt durchgeführten thematischen Verarbeitungen werden unter Kapitel IV/2, Verarbeitung der DS mit GIS- und BV - Software, vorgestellt.

2.1.1. Landsat MSS

Seit 1972 liefern die in vier Kanälen (vis: Kanal4,5; nir: Kanal 6,7) messenden Satelliten der Landsat - Serie mit ihrem Multi-Spectral Scanner (MSS) spektrale Daten der Erdoberfläche in digitaler Form. Die orbitalen Plattformen haben eine polnahe, sonnensynchrone Umlaufbahn in ca. 900 km Höhe mit einer Repetitionsrate von 18 Tagen (Landsat 1-3). Von der Erde reflektierte elektromag-

netische Strahlung wird von einem oszillierenden Spiegel zeilenweise auf Detektoren übertragen, dort in ein elektrisches Signal umgewandelt und Bodenstationen übermittelt. Eine eingehende Beschreibung des Landsat Systems (MSS und TM) findet sich bei SIEGAL&GILLESPIE (1980) und COLWELL (1983). Die aufgezeichneten Rohdaten werden nach Bedarf radiometrisch und geometrisch korrigiert und in gewünschter Lesedichte dem Nutzer digital oder auch als Standard - Photoprodukt zugänglich gemacht. Beide, die hier verwendeten MSS und TM Daten, wurden radiometrisch korrigiert von der EARTHNET - Empfangsstation in Frascati, Italien bezogen.

Die Lage der MSS und TM - Kanäle im elektromagnetischen Spektrum sei in Bezug auf die Durchlässigkeit der Atmosphäre angegeben (Abb.32). Die Begrenzung der Kanäle und ihre Charakteristik wird vom Detektormaterial und vorgeschalteten Filtern bestimmt.

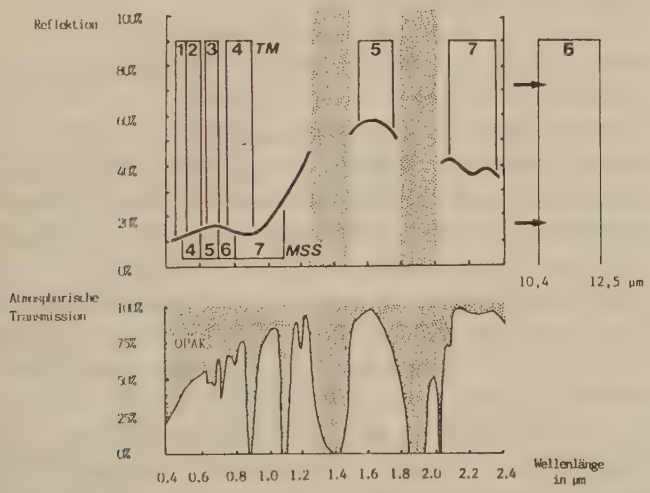


Abb.32 Lage der MSS und TM-Kanäle (engl. "bands") im elektromagnetischen Spektrum zwischen 0,4 und 2,4 µm in Bezug auf eine limonitische Gesteinsoberfläche und die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre

Jede Landsat - Szene stellt einen nach dem "Landsat Retrieval System" vom EROS Data Center (EDC), Sioux Falls USA, definierten, etwa 34 000 km² großen Ausschnitt der Erdoberfläche dar. Die Kantenlänge der Szenen entspricht 185x185 km am Boden. Jedem der 3600x2286 Bildelemente (Pixel) ist für jeden Kanal ein diskreter Messwert mit 6 Bit, das entspricht einem radiometrischen Datenumfang von 128 Stufen, zugeordnet.

Die Kanäle des MSS wurden zwar primär für landwirtschaftliche Zwecke konzipiert, aber bereits mit den ersten verfügbaren Daten begann eine intensive Forschung nach den Möglichkeiten einer geologischen Nutzung. Inzwischen gehört eine Satellitenbildauswertung (MSS) bei vielen großflächigen geologischen Problemstellungen bereits zu den Standardverfahren. Drei Nutzungsebenen spielen für die Anwendung in der Exploration auf mineralische Rohstoffe eine wichtige Rolle:

--- STRUKTURELLE INFORMATIONEN
(kontinentale Großstrukturen, regionale tektonische Elemente, Gänge, Feinstrukturen)

--- SPEKTRAL-LITHOLOGISCHE INFORMATIONEN
(lithologische Differenzierungen auf Grund verschiedener Reflektionseigenschaften exponierter Böden und Gesteine)

--- GEOBOTANISCHE INFORMATIONEN
('indirekte' Hinweise auf Lithologie und Vererzungen, speziell in bewachsenen Gebieten)

Wichtige Grundlagen erarbeiteten LATHRAM&GRYC (1973), VILJOEN et al. (1975), ROWAN (1975), OFFIELD et al. (1977), SMITH (1977), GOLD in SIEGAL&GILLESPIE (1980) mit Untersuchungen über Zusammenhänge von tektonischen Strukturen, geotektonischen und metallogenetischen Provinzen mit MSS - Verarbeitungen und - Interpretationen.

HUNT et al. (1970-76) schufen mit ihren Reihenuntersuchungen zum spektralen Verhalten mineralischer und lithologischer Oberflächen im vis/nir/swir - Bereich eine exzellente Basis für anwendungsbezogene FE - Forschung. SCHMIDT&BERNSTEIN (1975), PODWYSOCKI et al. (1977), ROWAN et al. (1977), ABRAMS et al. (1977, 1983), GOETZ&ROWAN (1981), GOETZ et al. (1983), SEGAL (1983) befassten sich mit den Möglichkeiten spektral-lithologischer Kartierung für die Exploration.

In den letzten Jahren wurden besonders Anstrengungen unternommen, spektrale Anomalien in einer Vegetationsbedeckung über Vererzungen zu erkennen Solche indirekten, geobotanischen Indikatoren für Schwermetallstress in Pflanzenpopulationen und ihre Auswertung an Hand von MSS - Daten verfolgten BROOKS (1972), LAG&BOLVIKEN (1974), BOLVIKEN et al. (1977), SCHWALLER&TKACK (1980), RAINES&CANNEY in SIEGAL&GILLESPIE (1980), BANNINGER (1981), LABOVITZ et al. (1983) und GOETZ et al. (1983).

Als systembedingte Einschränkungen für die Nutzung von MSS - Daten in der Exploration werden von den meisten Autoren genannt:

--- grobe räumliche Auflösung (79mx56m) (viele Explorationsziele haben geringe Oberflächenausdehnung)
--- zu breite spektrale Fenster der Kanäle
--- keine Kanäle im kurzwelligen Infrarot, swir (wichtige Oberflächenminerale haben gerade hier typische Reflektionseigenschaften)
--- geringe radiometrische Auflösung

Thematischer Informationsgehalt:
Strukturelle Untersuchungen der MSS - Daten bringen wesentlich weniger Detailinformationen als die ebenfalls zur Verfügung stehenden TM - Daten mit 30 m räumlicher Auflösung und sollen sich daher auf diese beschränken. Großstrukturen, die mit MSS synoptisch leicht kartierbar sind, treten im Testgebiet wegen seiner geringen Ausdehnung (ca.30kmx40km) nicht auf.

Eine geobotanische Auswertung von MSS - Daten im Untersuchungsraum ist prinzipiell möglich (BANNINGER, 1981). Die anthropogene Kontamination der Oberflächen, eine heterogene Vegetation und nur geringe Intensitätsunterschiede zum unbeeinflußten Signal (durch Integration über 79mx59 m) lassen die Erfassung der oft kleinräumigen geobotanischen Anomalien in hohem Maße zwiedeutig und damit nicht aussagekräftig werden. Aus diesem Grund wird hier auf eine solche Bearbeitung verzichtet.

Spektral-lithologische Untersuchungen werden ebenfalls stark vom Vegetationsignal beeinflusst, in einem Areal mit wechselndem Vegetationstyp und variierender Vegetationsdichte läßt dies besondere Schwierigkeiten erwarten. Quarz, Glimmer-, Tonminerale, Feldspäte als häufige Bodenminerale zeigen nur geringe Unterschiede ihrer spektralen Charakteristika in den MSS - Kanälen (HUNT et al. 1970-76,GOETZ 1983). Dagegen gilt für oxidische Eisenminerale gegenüber sonstigen mineralischen Oberflächen eine ausgeprägte Absorption der Strahlung zwischen 0.85 und 0.95 µm (Abb.32 S.63). Anreicherungen von Goethit, Limonit und Hämatit im Anstehenden oder in Böden können Anzeiger für Hutbildungen über Kieserzen sein und sind besonders bei ausreichendem spektralem

Kontrast zum Nebengestein detektierbar (BOTHOREL et al.1984, RAINES&GABELL 1982). SEGAL (1983) fand über die numerische Analyse von MSS - Daten, daß eine komplexe Verarbeitung aller 4 MSS - Kanäle schließlich vier Gruppen von Oberflächen in ihren Intensität am besten trennt:
Limonitische Gesteine, nicht limonitische Gesteine (gleich welcher Lithologie!), immergrüne und laubabwerfende Pflanzen.
Er schlägt ein "compound ratio" (4/5)/(6/7) vor, also einen Vergleich der Verhältnisbildungen (Quotient der Grauwerte) von MSS - Kanälen im Sichtbaren (4 und 5) und nahen Infrarot (6 und 7). Eine solche Verhältnisbildung sei im Folgenden mit "Doppelratio" benannt. Limonitische Oberflächen, hier stellvertretend für alle Fe^{3+}-reichen Materialien, erhalten dabei die niedrigsten Ratiowerte (Abb.33) und sind von Vegetationssignalen deutlicher getrennt als bei einfachen Verhältnisbildungen. SEGAL betont ausdrücklich, daß diese Technik für verschiedene Klimazonen mit unterschiedlichster Vegetationsdichte und -verteilung angewendet und auf ihre Zuverlässigkeit geprüft wurde.

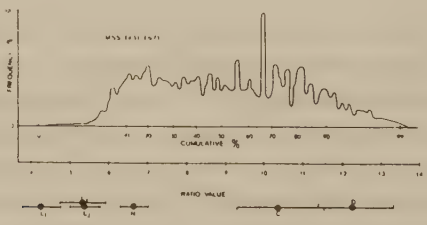


Abb.33 Histogramm der Doppelratio - Werte für wichtige spektrale Oberflächen aus SEGAL (1983) MSS (4/5)/(6/7) Daten mit der Lage von Mittelwerten (Punkt) und Standardabweichung (Linie) von Trainingsflächen: L1-L3 limonitische, N nichtlimonitische Oberflächen, D laubabwerfende Pflanzen und C Nadelbäume

Fe^{3+}-haltige Oberflächen sind im Kiesgürtel weit verbreitet, Ausbisse hämatitreicher Gesteine (Manganschiefer, bunte Tonschiefer, z.T. meta-Basalte) und sulfidische Erze in flacher Teufe weisen jedoch oft sehr hohe Konzentrationen im Anstehenden auf. Diese Vorkommen haben aber nur manchmal eine Ausdehnung, die einen sicheren Nachweis mit MSS ermöglicht. Viele kleine Flächen

und Schürfe erreichen nicht einmal Pixelgröße und können dann durch Mischsignalbildung unsicher in der Deutung werden.

Von EARTHNET wurde eine wolkenfreie Szene vom 8.5.1977 (218/34, LS2, ID 2218034046) bezogen, um Daten eines Zeitpunktes mit stabilem Wachstumszustand (Ende der Vegetationsperiode) und geringen Niederschlägen in den Wochen davor zu gewährleisten. Die Klimaaufzeichnungen der Ca. Tharsis S.A. registrierten für April 1.2 mm und für Mai 0 mm Niederschlag und damit homogene Bedingungen. Die Einzel - Ratios 4/5 und 6/7 wurden nach

$$G \text{ (neuer Pixelwert)} = \left(\frac{G_z \cdot 100 + Add_1^*}{G_n \cdot 1 + Add_2^*}\right)$$

G_z Grauwert Zähler, G_n Grauwert Nenner, Add_1, Add_2 additive Konstanten

* Histogrammanpassung wegen unterschiedlichen Dunsteffekten (engl.haze) in den vier Kanälen

berechnet. Für das Doppelratio (4/5)/(6/7) wurde die Prozedur mit den Zwischenergebnissen wiederholt. Das Ergebnis ist nach der Kontrastverstärkung ein "flaues" Bild mit wenigen Flächen, die niedrige Grauwerte (dunkelgrau, schwarz) aufweisen. Vegetationssignale sind völlig unterdrückt und morphologische Schatteneffekte eliminiert. An großflächigen Abbauen und Halden läßt sich die Trennung der gesuchten spektralen Oberflächen demonstrieren (Abb.34); stark oxidische Halden N Filon Norte und Lagunazo sowie der Gossan des Filon Sur besitzen die niedrigsten Werte. Mittlere Grauwerte zeigt frisch umgebrochenes Gelände mit exponiertem Roterdeboden.

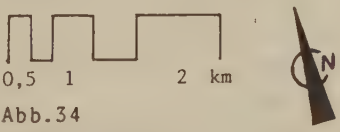


Abb.34
MSS-Doppelratio (4/5)/(6/7) kontrastverstärkt, nicht geometrisch korrigiert, niedrige Werte = schwarz, hohe = weiss. Beachte starke Anomalien: 1 Halden N F.Norte 2 Halden und Gossan Lagunazo 3 Halden und Gossan F.Sur

2.1.2. Landsat TM

Im Juli wurde die Erdbeobachtungsplattform Landsat 4 in den Orbit gebracht. Die Bahnparameter ähneln denen der vorausgegangenen Satelliten der Landsat Reihe. Zum erstenmal war außer einem MSS

ein hochauflösendes System an Bord, genannt "Thematic Mapper" (TM). Mit herkömmlicher Scanner Technologie, also einem mechanisch bewegten Drehspiegel, tastet TM die Erdoberfläche ab, mißt spektrale Reflektion in sechs Kanälen (30mx30m Bodenauflösung) und die Emmission thermaler Strahlung (120mx120m Auflösung),siehe auch Abb.32 S.63. Die Messdaten werden mit einem radiometrischen Umfang von 8 Bit an die Bodenstationen übermittelt. TM - Daten von Europa können von den ESA - Stationen Fucino (Frascati,Italien) und Kiruna (Schweden) empfangen werden. Die hier verarbeiteten TM - Daten wurden bereits geometrisch korrigiert von EARTHNET in Frascati direkt bezogen.
Satellitengetragene TM - Daten sind erst seit Beginn des Jahres 1983 für Nordamerika und seit 1984 für Europa allgemein erhältlich. Breite Erfahrungen mit ihrem geologischen Informationsgehalt wie bei MSS liegen bis jetzt nicht vor. Untersuchungen stützen sich bisher hauptsächlich auf TM - Simulatordaten (TMS) aus Befliegungen. Besondere Bedeutung wurde dem speziell für Zwecke der Exploration im späten Planungsstadium eingefügten Kanal 7 (swir) beigemessen. TMS - Daten und ihre Nutzung für die Exploration auf mineralische Rohstoffe untersuchten LYON et al.(1982) und RICKMAN&SADOWSKI (1982). Schwerpunkte waren dabei porphyry copper Mineralisationen und komplexe Kiesvererzungen in den westlichen USA. Mit den ersten aus dem Orbit übermittelten TM - Daten befassen sich z.Zt. mannigfache Arbeiten vor allem in den USA. WESCOTT&GABELMAN (1983) und ABRAMS et al. (1985) legten als erste Ergebnisse vor, die eine wesentliche Verbesserung struktureller und lithologischer Informationen gegenüber MSS - Daten nachweisen.
Ein Vergleich der spektralen Bandbreite und Lage der Kanäle mit MSS (Abb.32 S.63) zeigt bereits zwei wesentliche Eigenschaften der TM - Daten. Zum einen sind im vis- und nir-Bereich die Filter engbandiger ausgelegt, d.h. die spektrale Charakteristik einer Oberfläche klarer definiert als Integral über einen engeren Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums. Zum anderen liegen auch Informationen aus swir-Kanälen vor, in atmosphärischen Fenstern also, in denen sich Minerale wesentlich deutlicher in ihrem Reflektionsverhalten unterscheiden als im vis/nir (vgl.HUNT et al.1970-76).
Für geologische Zwecke als weitgehend unbrauchbar erwies sich nach den ersten Testdaten der Thermalkanal mit seinen beachtli-

chen 120 m Bodenauflösung (vgl. HCMM mit 600 m). Die ortszeitkonstante Datenerfassung etwa um 10 Uhr vormittags ist als ungünstig für die Erkennung von Gesteinen auf Grund unterschiedlichen thermalen Verhaltens zu werten (SABINS in SIEGAL&GILLESPIE, 1980). So wird lediglich die Morphologie, die durch das Sonnenlicht bereits erwärmten SE - Seiten (Nordhalbkugel) im Gegensatz zu den noch kühlen NW - Seiten verstärkt (Abb.35,S.69a). Da Strukturen und Morphologie dank besserer räumlicher Auflösung weit differenzierter in den anderen Kanälen sichtbar gemacht werden können, wird in diesen Untersuchungen auf die thermale Information verzichtet.

Zu Beginn dieser Arbeiten waren als TM - Daten des Testgebiets nur zwei Szenen in guter Qualität und ohne Wolkenbedeckung verfügbar, beide stammen vom Januar 1983. Die Entscheidung fiel auf die das Untersuchungsgebiet vollständig abdeckende Viertelszene vom 26.1.83, Ortszeit der Aufnahme: 10:37, ID: L4T83 26203 34F04-2 mit den Mittelpunktskoordinaten 7,822oW und 37,483N; wohl wissend, daß der niedrige Sonnenstand (26,4°) für spektrallithologische Untersuchungen nicht ideal ist. Positiv war aber zu bewerten, daß durch das geringe Relief des Testgebiets Geländeschatten nicht dominierend auftreten, Daten vom Höhepunkt der Vegetationsperiode vorlagen und die spektrale Signatur für junges Chlorophyll auch verschiedener Pflanzen ähnlich ist, und schließlich daß durch einen Azimuth von 146,5° die bedeutendsten geologischen Strukturen verstärkt werden und damit eine gute Grundlage für strukturelle Untersuchungen bilden. Die digitalen Daten waren über die radiometrische Korrektur hinaus noch vollständig geometrisch entzerrt.

Kontrastverstärkte Abspielungen aller 7 Kanäle zeigt Abb.35 S.69a. Man beachte die unterschiedliche Beeinflussung von verschiedenen Vegetationssignaturen (Felder, Aufforstungen) auf die Bilddaten. Kanal 6 (tir) zeichnet lediglich die Morphologie nach.

Thematischer Informationsgehalt:
Grundsätzlich gelten die schon unter Kap.2.1.1., MSS, beschriebenen drei möglichen Anwendungsfelder auch für TM - Daten.

Geobotanische Informationen lassen grundsätzlich detailliertere Aussagen (verglichen mit MSS) erwarten, leider ist eine wesentliche Voraussetzung dafür bei den zur Verfügung stehenden Daten nicht gegeben. So soll die Vegetation möglichst große spektrale Kontraste zwischen anomalem (metallgestresstem) und normalem (gesundem) Zustand zeigen, dies ist nach BANNINGER (1980) für den Kiesgürtel erst im Frühsommer bis Hochsommer zu erwarten. Im Januar jedoch befindet sich die Vegetation auf dem Höhepunkt ihrer Wachstumsphase und solche Kontraste sind zu diesem Zeitpunkt minimal, Sommerdaten waren nicht verfügbar. Da außerdem noch die für MSS gemachten Einschränkungen einer geobotanischen Nutzung (anthropogene Kontamination, ungleichförmige Vegetation)

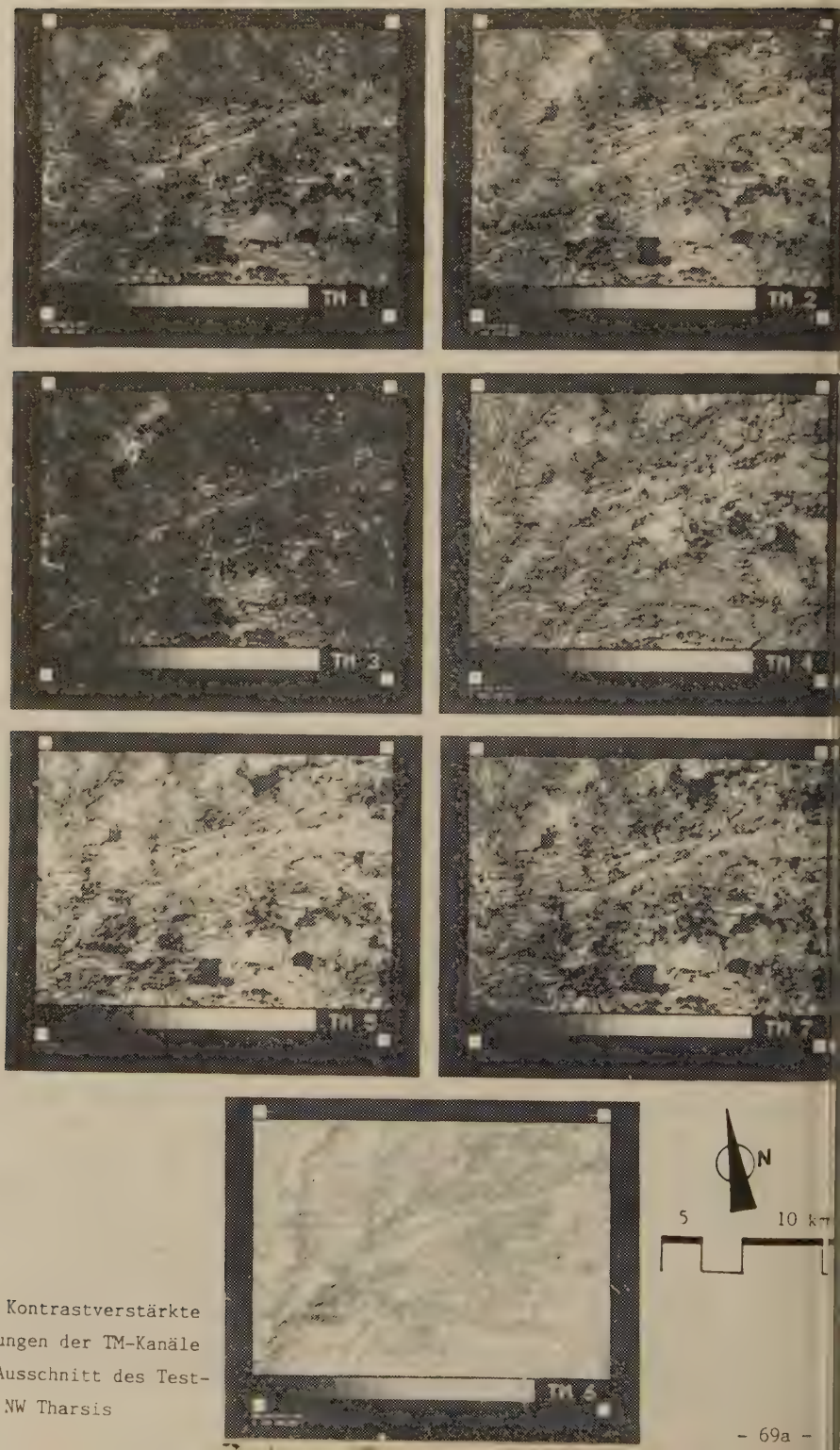


Abb.35 Kontrastverstärkte Abspielungen der TM-Kanäle 1 - 7, Ausschnitt des Testgebiets NW Tharsis

gelten, soll sich die Nutzung der TM - Daten auf strukturelle und lithologische Untersuchungen beschränken.

Die hohe räumliche Auflösung von 30 m und der günstige flache Sonnenstand prädestinieren die Daten für strukturelle Untersuchungen; so wurde eine kontrastverstärkte Abspielung von Kanal 4 (nir) für eine tektonische Analyse genutzt (vgl. Kap. II/2.3.). Diese Verarbeitung entspricht weitgehend dem Verfahren, wie es üblicherweise für MSS Kanal 7 (nir) zur Struktur- und Texturkartierung verwendet wird (SIEGAL&GILLESPIE, 1980). Betrachtet man die radiometrische Dynamik der einzelnen TM - Kanäle (Anhang 2), so empfiehlt sich außerdem Kanal 5 (swir), er zeichnet morphologische Phänomene mit den größten Amplituden nach. Texturelle Informationen sind dagegen weniger einheitlich zu erhalten, denn die Vegetation differenziert deutlicher und maskiert eher geomorphologische Rauhigkeit als Kanal-4-Daten. Doch ist die Erkennbarkeit der Strukturen durch den stärkeren Original - Kontrast deutlich besser. Mit beiden Kanälen wurden strukturverstärkende Verarbeitungen durchgeführt, um die für eine Interpretation günstigste auszuwählen. In der digitalen Bildverarbeitung übliche Verfahren sind dabei:

--- Frequenzfilter (high-, median- und low-pass Filter), für die Verstärkung feiner Strukturen ist nur der high-pass (Hochpass) Filter geeignet

--- Pseudo-Plastik, eine gerichtete Ableitung, die die "Steigung" zu benachbarten, diagonal gelegenen Pixeln abbildet (synthetischer Beleuchtungseffekt, vgl. BODECHTEL&KRITIKOS (1971))

Die Hochpass - Filterungen wurden mit einem 3x3 Filter durchgeführt, sie weisen für beide Kanäle eine ungenügende visuelle Interpretationsgrundlage auf. Um sowohl die E-W streichende als auch quersetzende Strukturen gezielt zu verstärken, ergaben interaktive Tests am Bildschirm eine Beleuchtungsrichtung von NE als optimal für die Pseudo-Plastik Verarbeitung (Abb. 36,S.71). Kanal 5 Pseudo-Plastik zeigte die beste Wiedergabe bekannter Strukturen im VK, so die elongierten Vulkanitkörper im VK und durch das intensive Grauwert - Relief die Ausdehnung des VK insgesamt. Ein besonders intensives Relief ist dort wahrzunehmen,

wo lithologisch abwechslungsreiche VK - Serien anstehen. Außerdem sind ausreichend nicht geologisch bedingte Oberfächenphänomene (Flüsse, Stauseen usw.) zu erkennen, die eine Orientierung im Gelände erleichtern.

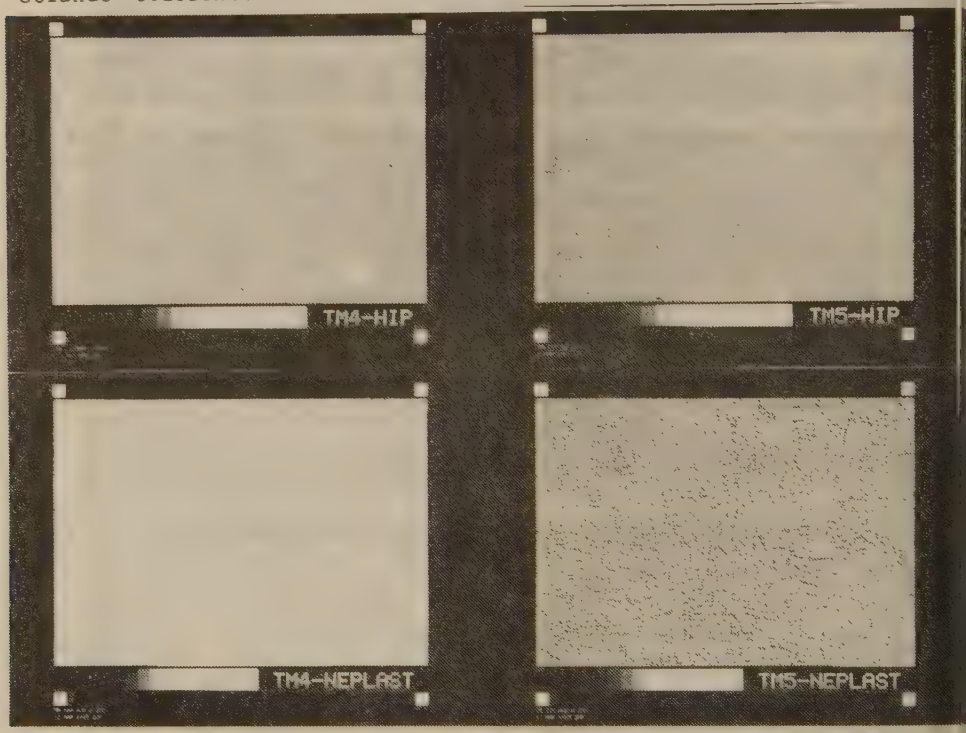


Abb.36 Strukturverstärkende Verarbeitungen der TM - Kanäle 4, 5 3x3 Hochpass (HIP) und NE - Pseudo-Plast (NEPLAST)

N 10 km

Für eine spektral-lithologische Auswertung von TM - Daten eines mediterranen Gebietes stehen bis dato weder Erfahrungen noch standardisierte Verfahren zur Verfügung, da satellitenakquirierte TM - Daten im europäischen Raum erst seit Beginn 1984 erhältlich sind. So muß der Informationsgehalt der einzelnen Kanäle unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse diskutiert werden. Hierzu wurden spektrale Profile parallel zu den im Gelände aufgenommenen geologischen Profil D-D' aus den Daten entnommen (Anhang 3).

In einer Vorauswahl zeigen die Kanäle 1 und 2 (vis) eine sehr hohe Korrelation, Kanal 1 besitzt infolge der stärkeren atmosphärischen Streuung für blaues Licht ("skylight") eine Verschiebung

der Intensitätsstatistik hin zu höheren Werten ("offset"). Versuche, diese Daten auch nach geeigneten Kontrastmanipulationen mit den geologischen Profildaten zu korrelieren, schlugen fehl. Da auch spektrale Feldmessungen für Gesteine, die im Testgebiet auftreten (Abb. 39 S. 76), keine signifikanten Reflektionsunterschiede in diesen beiden Kanälen erwarten lassen, sollen sie ebenso wie der Thermalkanal (6) für eine spektrallithologische Analyse unberücksichtigt bleiben. Betrachtet man die Kanäle 3,4,5 und 7 (vis,nir,swir) und ihre Korrelation mit den geologischen Daten, können nur geringe morphologieunabhängige Unterschiede festgestellt werden.

Hier wurden nun zwei verschiedene Wege auf der Grundlage eines repräsentativen Ausschnittes (Gebiet zwischen Cabezas Rubias und Alosno, 512x512 Pixel), beschritten.
Zuerst wurden an einem interaktiven Bildverarbeitungssystem Standardverfahren der Bildverarbeitung (Kontrastverstärkung, Ratio und Produkttransformationen) auf ihre Informationsverstärkung bezüglich der geologischen Karte untersucht. Lediglich das Ratio der Kanäle 3/4 (vis,nir) trennte bewachsene von mineralischen Oberflächen und zeigte so deutlich die bergbaulichen Aktivitäten (Abb. 37, Pfeile). Aber weder limonitische von nichtlimonitischen Oberflächen, noch weitere lithologischen Details sind unterscheidbar. Alle weiteren Ratios und Produkte brachten keine zusätzlichen thematischen Informationen.
Kontrastoptimierte Darstellungen der Kanäle 4 (nir) und mit Einschränkung 5 (swir) boten noch die besten Möglichkeiten, anstehenden VK von TG und TQ zu trennen. Kanal 4 zeigt die Reflektionswerte für Flächen mit verschiedener Vegetation relativ einheitlich und stört dadurch lithologische Phänomene am wenigsten oder überlagert sie einheitlich (Abb. 35 S. 69a).

Zum Anderen sollten gezielt erprobte Maßnahmen der Bildverbesserung für TM - Daten eingesetzt werden, um thematisch interessante DS zu erhalten. Eine Hauptachsentransformation kann hier nach HAYDN&BODECHTEL (1975) ein wertvolles statistisches Werkzeug sein. ABRAMS et al.(1985) beschreiben die Möglichkeit, in Gebieten des Südwestens der USA mit Hilfe von Hauptachsentransformationen aus mehreren TM - Kanälen bessere spektrallithologische Informationen als mit Ein- und ZweiKanal - Verfahren zu erhalten.

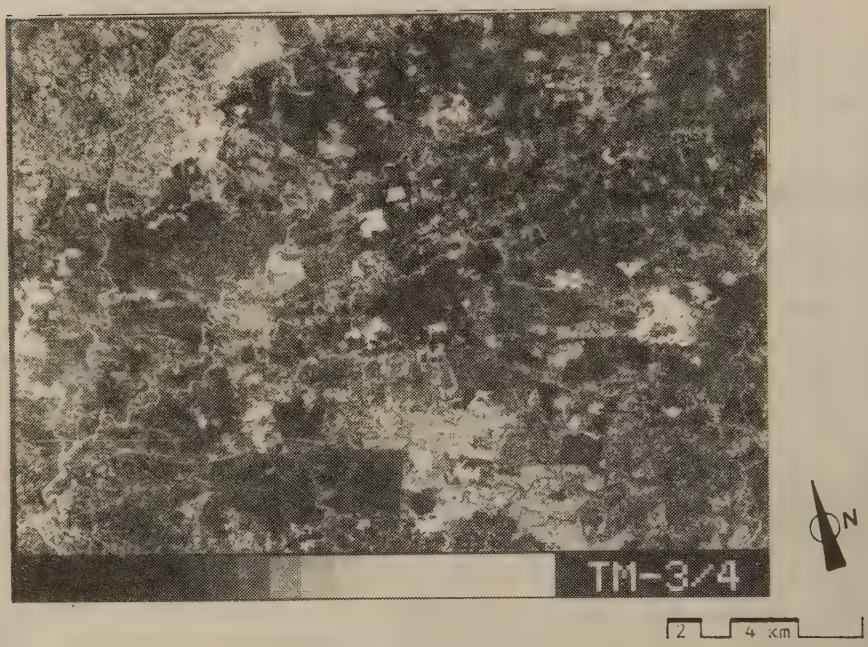


Abb.37 Ratio TM 3/4 des Testgebiets, beachte unbewachsene Oberflächen besonders um die großen Tagebaue (Pfeile, helle Flächen)

Die Hauptachsentransformation ist jedoch, und das sollte berücksichtigt werden, ein Verfahren, das auf einer statistischen Analyse der Daten beruht, und daher nicht automatisch gesuchte Phänomene verstärken muß. Die spektralen Unterschiede für interessierende Oberflächen in den selbst am wenigsten korrelierenden Kanälen sind für eine direkte Verstärkung oft noch zu gering, wie sich auch aus der empirischen Bearbeitung bereits ergab.

Um nun solche Differenzen deutlich sichtbar zu machen, wurde eine Hauptachsentransformation (engl. Principal Component Analysis, PCA) durchgeführt.

Sammelt man alle Pixel mit n Kanälen entsprechend ihren Grauwerten in einer n-dimensionalen Verteilung, so sieht man in den meisten Fällen, daß sich eine ellipsoide Pixelwolke ergibt. Die einbeschriebene Korrelationsachse (längste Achse) stimmt in der Regel nicht mit den Achsen des Koordinatensystems überein. Man sucht nun ein neues Koordinatensystem, dessen eine Achse in der Richtung der Korrelationsachse zu liegen kommt. Die weiteren Achsen werden den anderen Ellipsoidachsen zugeordnet. Für die resultierenden Bilddaten läßt dies eine bessere Trennung der Grauwerte von bestimmten Oberflächen erwarten.
Die PCA basiert in diesem Fall auf der Analyse der Kovarianzmatrix der verwendeten Kanäle eines alle wichtigen Phänomene repräsentierenden Testfeldes. Mit Hilfe der Eigenwert- und Eigenvektoranalyse werden für jede Achse Wichtungsfaktoren für die einzelnen Kanäle bestimmt. Die resultierenden Bilder (Hauptachsen, engl. Principal Components, PC) sind Linearkombinationen,

die den 8 Bit Bilddaten angepasst wurden. Für das oben bereits bestimmte Testfeld, das wenig Bewuchs und fast alle geologisch wichtigen Serien zeigt, ergibt sich für die 4 Kanäle folgende Korrelationsmatrix :

	TM 3	TM 4	TM 5	TM7
TM 3	1.000	0.565	0.806	0.861
TM 4	0.565	1.000	0.705	0.593
TM 5	0.806	0.705	1.000	0.948
TM 7	0.861	0.593	0.948	1.000

Die Ergebnisse zeigt Abb.38, es ergeben sich bei PC 1-4 Bilddaten mit stark abnehmender Standardabweichung zu den hoheren Hauptachsen:

Standard-	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
abweichung:	18	5	3	1

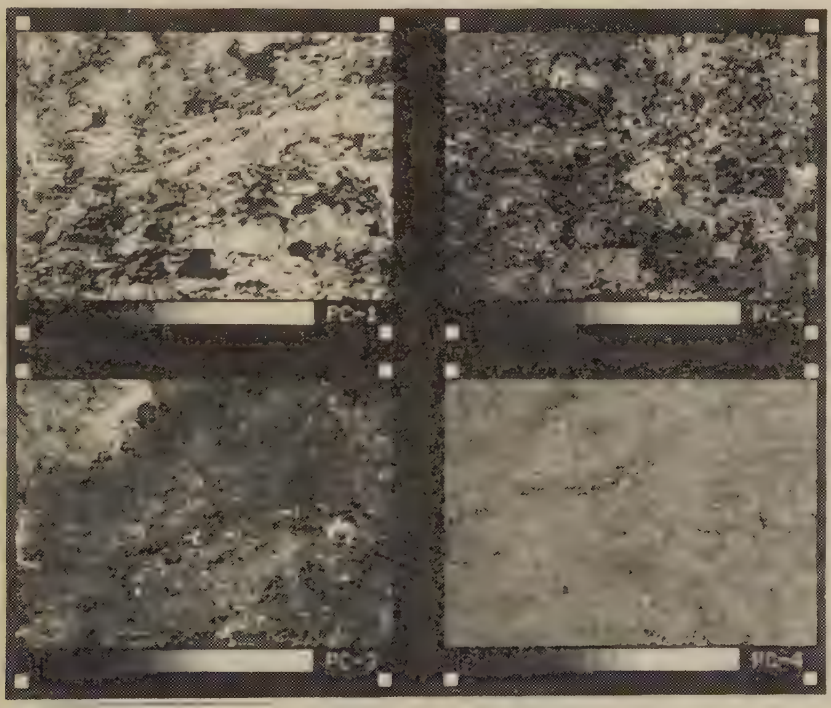
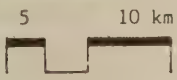


Abb.38 Vier Hauptachsen (PC 1 bis 4) aus den TM - Kanälen 3,4,5,7 für das Testgebiet



PC 1 weist für alle morphologisch bedingten Oberflächenphänomene und lithologische Einheiten, sowie für einige Vegetationsflächen eine optimale Differenzierung auf. PC 2 zeigt verstarkt Unterschiede der Vegetationssignale, Morphologie und Lithologie sind mit Ausnahme der Signaturen fur die verschiedenen Haldenoberflachen unterdrückt. PC 3 differenziert als einzige deutlich sicht-

baren Phänomene die Halden und limonitischen Materialien gegenüber nichtlimonitischen Oberflächen, das "Rauschen" der Bilddaten ist bereits sehr hoch. PC 4 schliesslich ist für Zwecke einer lithologischen Interpretation nicht brauchbar, es werden vor allem systembedingte Datenfehler sichtbar. Für eine lithologische Differenzierung der Serien des VK erscheint PC 1 als geeignetste Grundlage. Limonitische Oberflächen werden zwar ebenfalls gut von anderen Signalen getrennt (PC 2,3), aber es wird nicht eine solch optimale Differenzierung erreicht, wie bei dem im Folgenden besprochenen Doppelratio .

Eine weitere wichtige Möglichkeit einer gezielten Informationsverstärkung ergibt sich aus den spektralen Eigenschaften stark limonitischer Oberflächen und der Lage und Bandbreite der TM-Kanäle.
Das Reflektionsverhalten von Gesteinen, die für den Kiesgürtel typisch sind, zeigt deutlich die Absorption bei 0,9 µm, verursacht durch Minerale mit hohem Fe^{3+}-Gehalt (Abb.39 S.76). Die Absorption bei 2,2 µm, hervorgerufen durch Schichtsilikate mit hohem Anteil an OH^{2-} Gruppen, läßt hoffen, über das spektrale Verhalten im TM - Kanal 7 (swir) differenzierende Daten speziell in Serien des VK zu erhalten.
Verhältnisbildungen zwischen TM 5 und 7 (swir) zeigten allerdings keinerlei spektrallithologische Differenzierung bei interaktiven Tests, anders als ELVIDGE&LYON (1985) für eine vergleichbare Lagerstättenprovinz in Virginia, USA feststellten. Ein Grund könnte die Bodenbildung mit ihrem Übergewicht an Tonmineralen auch auf vulkanogenen Einheiten sein.
Um nun detaillierte Unterscheidungen Fe^{3+}-haltiger und anderer Oberflächen zu erreichen, wurde TM 4 (nir) mit seiner Lage im Zentrum des Absorptionsmaximums und die benachbarten Kanäle 3 und 5 (vis,swir) betrachtet (Abb.32 S.63 ,Abb.39 S.76). Bei Ratioberechnungen zwischen 3/4 und 4/5 müßten z.B. für limonitische Gesteine eine extreme Trennung zu allen anderen Oberflächen einschließlich der Vegetation ergeben. Die sich daraus empfehlende Verarbeitung (3/4)/(4/5) entspricht in seiner differenzierenden Wirkung dem von SEGAL vorgeschlagenen Verfahren, liefert jedoch Bilddaten, die Gossans, stark limonitische Halden und Böden noch besser von allen anderen Oberflächen trennen helfen (Abb.40 S.77).

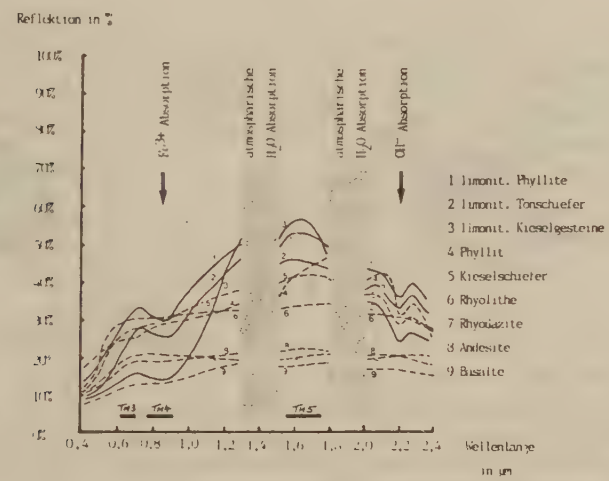


Abb. 39 Spektrales Verhalten von Vulkaniten und Sedimenten, Feldmessungen nach ROWAN&LATHRAM in SIEGAL&GILLESPIE (1981) Beachte Absorptionen bei 0,9 und 2,2 µm, verursacht durch Minerale mit hohem Fe^{3+}-Gehalt bzw. schwachgebundenen OH^- Gruppen in Tonmineralen und Glimmern.

Besonders augenfällig ist dies in den Tagebauen um Tharsis, an verschieden alten Halden und ausgeprägten Hutbildungen. Die niedrigsten Werte dieses Doppelratios sind identisch mit stark limonitischen und hämatitischen Gossans und zur Laugung ausgebreitetem Abraum der Oxidationszone (NE Tharsis, Filon Sur, Lagunazo, La Lapilla). Im Gegensatz zum Ratio TM 3/4 (vis/nir) zeigt nichtoxidischer Abraum und alle anderen mineralischen Oberflächen maximal mittlere Grauwerte. Vegetation und Schatten sind vollständig eliminiert. Eine Fehlerquelle sind Flächen frisch umgebrochenen Roterdebodens. Sie weisen wohl auch niedrige Doppelratiowerte auf, sind aber durch ihre unterscheidbar höheren Grauwerte und ihre scharf begrenzten Umrisse leicht zu unterscheiden. Insgesamt kann diese Verarbeitung als wirkungsvolle Methode zur Kartierung von Oxidationszonen auch in bewachsenen Regionen benützt werden.

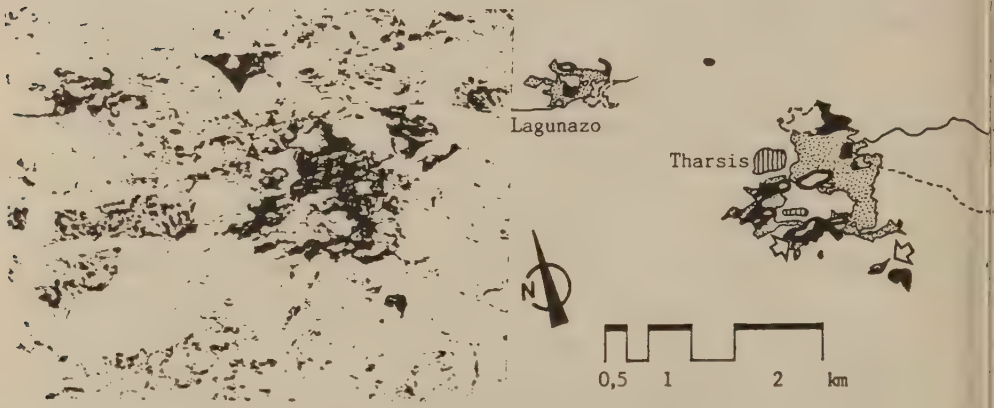


Abb. 40 TM-Doppelratio ($\frac{3}{4}/\frac{4}{5}$) zur gezielten Verstärkung stark Fe^{3+}haltiger Oberflächen, links Verarbeitung rechts Geländekartierung von Halden und Gossans um Tharsis, man beachte a) ausgezeichnete Korrelation mit Halden und Gossans
b) Grauwerte der aktiven Abbaue
c) Trennung oxidischer und wenig oxidischer Halden
d) Gossan in situ gegenüber Haldenmaterial geringere Grauwerte aufweisen kann ( )
e) Morphologie- und Vegetationseffekte unterdrückt sind

Erzbahn
Stausee
Siedlung
Halden ohne Gossanmaterial
Gossanhalden und Gossan
aktive und inaktive Tageb

Für Explorationsvorhaben können TM - Daten noch in einer weiteren Weise hilfreich sein. Bei der Planung von geländeintensiven Arbeiten, wie geologischen Detailkartierungen, geophysikalischen Bodenmessungen, geochemischen Probennahmen liefern aktuelle Abspielungen der TM - Kanäle 4 (nir) und 5 (swir) Informationen über den Vegetationszustand und die -verteilung. Ein synoptischer Überblick verhilft zu besserer Planung und Arbeitseinteilung. Sie können bei fehlender oder ungenauer topographischer Grundlage gerade bei größeren Gebieten ausgezeichnete Orientierungsunterlagen stellen. Die 30 m Bildelementgröße gewährleistet eine hohe Detailtreue. Sollte die Orientierung an Hand von morphologischen Merkmalen und weniger an verschiedenartigen Vegetationsflächen erfolgen, empfiehlt sich eine kontrastverstärkte Abspielung von TM 4, im umgekehrten Fall TM 5. Flacher Sonnenstand ist wegen der ausgeprägt plastischen Wirkung der abgebildeten Oberfläche von Nutzen.

2.1.3. Luftbild

Das panchromatische Schwarz-Weissluftbild, empfindlich für den sichtbaren Teil des Spektrums, ist nach wie vor ein in der Exploration verbreitetes und vielbenutztes Informationsmedium. Obwohl für das Abbaugebiet um Tharsis auch Infrarot - Falschfarbenbilder zur Verfügung standen (Prof. KOOPMANS, ITC), zeigte ein Vergleich mit sw-Aufnahmen aus dem Jahr 1974, daß erstere wegen

--- starker Randabschattung
--- fehlender lithologischer und struktureller Differenzierung
--- sehr beschränkter Abdeckung des Testgebiets

als integrationsfähige Informationsebene wenig geeignet sind. So beschränkt sich dieses Kapitel auf die Nutzung des panchromatischen Materials.

Der panchromatische sw-Film zeichnet die vom Objekt reflektierte Sonnenstrahlung so auf, daß dies weitgehend direkt der vom menschlichen Auge empfundenen Helligkeit entspricht. Dies hat den großen Vorteil einer unmittelbaren Umsetzung und Erkennbarkeit der abgebildeten Objekte. Über Informationen der Filmcharakteristiken, Kameratypen und des geometrischen Abbildungsverhaltens sei auf COLWELL (1983), Manual of Remote Sensing, verwiesen. Das Luftbild hat gegenüber anderen Fernerkundungsdaten eine Reihe von Eigenschaften, die es in der Geologie unersetzbar macht:

--- hohe Auflösung (bis zu 0.1 m) und somit
--- direkte Erkennbarkeit von Objektoberflächen
--- strukturelle Feinheiten in großem Maßstab synoptisch erkennbar
--- bei kleinen Gebieten preiswerte Flächenmethode
--- stereoskopische Abdeckung

Wesentliche Nachteile sind dagegen:

--- lithologische Einheiten häufig nicht unterscheidbar
--- bedeutende geometrische Verzerrungen zur Karte
--- Randabschattung
--- für Großstrukturen zu wenig synoptisch
--- wenig Möglichkeiten, Informationsgehalte durch digitale Bildverarbeitung zu verstärken.

Die Luftbilder einer Befliegung von 1974 (s.Kap.II/2.3.) wurden ausgewählt, da zu diesem Zeitpunkt noch keine großflächi-

gen Eukalyptus - Aufforstungen im Testgebiet stattgefunden hatten. Ein Test mit Luftbildern von 1981 ergab die nachteilige Beeinflussung bei einem Strukturinventar durch die Maskierung mit Aufforstungen.

Thematischer Informationsgehalt:

Für die Situation im Untersuchungsgebiet ergeben sich als sinnvolle Verwendung des sw-Luftbildes:

--- topographische Grundlage für DS mit schwieriger Oberflächenorientierung

--- Strukturdichteauswertung und Verwendung als Strukturdichtepläne

Das Luftbild enthält eine Fülle von detaillierten Oberflächeninformationen, die zur Erklärung und Deutung anderer Messergebnisse dienen können, so etwa für die elektromagnetischen und spektrometrischen Verfahren. Wie bereits in Kap.II/2.3. gezeigt, geben Dichte und Anordnung streichender Strukturlinien Hinweise auf engräumig wechselnde Lithologie und konzentrische Umrahmungen von Vulkanitkomplexen im VK. Da solche Formlinien sich auch unter flacher TG - Überdeckung durchpausen, können damit unter Umständen für die Exploration interessante Bereiche in geringer Teufe fixiert werden.

Auf der Basis der Lineamentauswertung wurden alle Phänomene herangezogen, die augenscheinlich keinen anthropogenen Ursprung haben. Auch nicht-schichtgebundene Phänomene sollten verwendet werden; Bereiche kleinräumig abweichenden Strukturverhaltens über massigen Vulkanitstöcken sind so mitberücksichtigt, deren großräumige Verteilungsdichte spielt jedoch gegenüber den etwa 10fach häufigeren ss- und sf-Lineamenten kaum eine Rolle. Alle kartierten Lineamente des Untersuchungsgebietes wurden dann über einem 500 m Raster ausgezählt, die Anzahl pro Einheit notiert und nach geometrischer Mittelung zwischen den Werten linear interpolierend Isolinien konstruiert. Die resultierende Karte zusammen mit der eingezeichneten, kartierten VK - Ausdehnung gibt Abb.41 wieder.

Vergleicht man die Strukturhäufungen mit der geologischen Karte, so lassen sich folgende Korrelationen erkennen:

--- Maxima von mehr als 8 LpR (Lineamente pro Rasterzelle) sind an den VK gebunden, bzw. die Randbereiche im Übergang zu TQ und TG

--- TQ und TG zeichnen sich durch niedrige Werte von 2 bis 6 LpR aus, wo höhere auftreten ist eine flache Überdeckung bzw. kleine VK - Fenster im TG nachzuweisen

--- Die höchsten Werte sind an Bereiche abnormalen Strukturverhaltens gebunden und belegen massige, intermediäre Vulkanitkörper (s.a.Kap.II/2.3., Tektonik)

Abb.41 Konstruierte Lineamentdichtekarte (alle Lin.) aus den 1974-er Luftbildern, ausgezählt im 500 m Raster

Einzelne Maxima vermitteln vor allem im W - Teil des Untersuchungsgebietes den Eindruck, als würden sie die Grenze VK/TG markieren. N des nördlichen VK - Zuges könnten sie auf teilweise sehr flache TG - Maskierung hindeuten. Das Profil (Anhang 1) belegt hier eine Muldenstruktur. Im Gelände wurde an zwei solchen Stellen (NW C.Gibraltar, E Malagonbrücke) rhyolitische Tuffe als Lesesteine in kartiertem TG gefunden. S Cabezas Rubias sind ebenfalls zwei 8 LpR - Häufungen an ausstreichenden VK gebunden. Dagegen sind solche Cluster W Tharsis auch nach gezielter Geländebegehung nicht verifizierbar. Daß einzelne Maxima sich lediglich als unterbrochene Ketten ("Perlschnüre") entlang den TQ/VK/TG - Grenzen hinziehen, kann bei der Betrachtung der Luftbilder erklärt werden. So machen einzelne kleine Aufforstungen und Korkeichenpflanzungen bei hoher lokaler Vegetationsdichte eine kontinuierliche Fortsetzung unmittelbar daneben sichtbarer Strukturen unmöglich. Es ist daher unumgänglich, diese Informationsquelle einer möglichen Ausdehnung des VK kritisch und keinesfalls für sich zu betrachten.

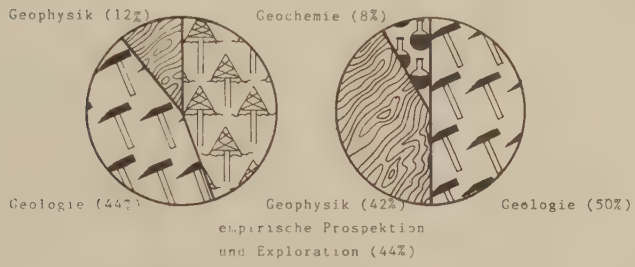
2.2. Geophysikalische Daten

Geophysikalische Messungen liefern abhängig vom Messystem Informationen auch aus größerer Teufe und sind daher für die Exploration heute unverzichtbare Standardverfahren. Auf die besondere Bedeutung der geophysikalischen Messmethoden sei mit den Ergebnissen von Explorationsmassnahmen auf Kieserzkörper in Kanada und SW-Spanien hingewiesen (Abb.42 S.81a). Es wird hier auch der Trend zu zielgerichteten Suchverfahren erkennbar, die gegenüber empirischer Vorgehensweise (Rasterbohrungen u.ä.) in der Bedeutung stark zunehmen.
Flugdaten ermöglichen kostengünstige flächendeckende Aufnahmen, sind allerdings durch den zusätzlichen Abstand zum Messobjekt, der Flughöhe, weniger empfindlich. Die BGR führte im Herbst 1977 über große Teile des Testgebiets eine geophysikalische Befliegung durch. Drei verschiedene Systeme lieferten Daten über den scheinbaren spezifischen Widerstand, die Totalintensität des Erdmagnetfeldes und die Gamma - Strahlung. Die Ca. Tharsis S.A. stellte Ergebnisse einer kleinräumigen gravimetrischen Untersuchung zur Verfügung. Die Ermittlung des thematischen Informationsgehaltes der Flugdaten erfolgt an Hand der von der BGR für diese Untersuchungen bereitgestellten Karten (Anhang 4). Die Begrenzung aller flächenhaften DS und das Testgebiet zeigt Abb.43 S. 82.

2.2.1. Flugmessungen

Die Helikoptervermessung wurde vom 17.9.-8.11. und 21.11.-29.11.1977 im Rahmen eines 6-jährigen Forschungsvorhabens (BMFT-NTS 6) realisiert. Die Fluglinien sind ±NS gerichtet und damit senkrecht zu den Hauptstrukturrichtungen. Die Flughöhe betrug rund 70 m über Grund, der Messlinienabstand war im Mittel 200 m und Messwerte wurden etwa alle 30 m (Magnetik, Spektrometrie) und 15 m (Elektromagnetik) aufgezeichnet. Für alle Daten ergaben sich drei schmale Lücken im mittleren Teil des Gebiets (s.Abb. 43). Anhang 5 zeigt schematisch die Verarbeitung und durchgeführte Korrekturen an den Rohdaten bis hin zu den vorverarbeiteten Messdaten. Sie lieferten die Grundlage für die Darstellung in Kartenform und die digitalen DS. Die vorliegenden Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands, der Totalintensität des Erdmagnetfeldes und der Gamma - Aktivität im U,Th und K - Fenster waren die Basis für die folgenden Untersuchungen.

Entdeckungsmethoden von polymetallischen Kieserzkörpern
Noranda district, Quebec, Canada

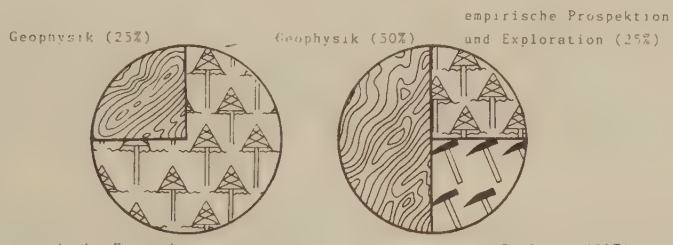


1913-1940
Vorräte 73,46 mio t
9 Vorkommen

1941-1977
Vorräte 40,74 mio t
12 Vorkommen

(nach BOLDY,1977)

Entdeckungsmethoden von polymetallischen Kieserzkörpern im
SW-iberischen Kiesgürtel



1955-1964
Vorräte >200 mio t
4 Vorkommen

1965-1974
Vorräte >230 mio t
12 Vorkommen

(nach STRAUSS et al.,1977)

Abb.42 Bedeutung von Geophysik und anderen Verfahren bei der Exploration auf polymetallische Kieserze (bedeutendes Verfahren bei der Entdeckung)

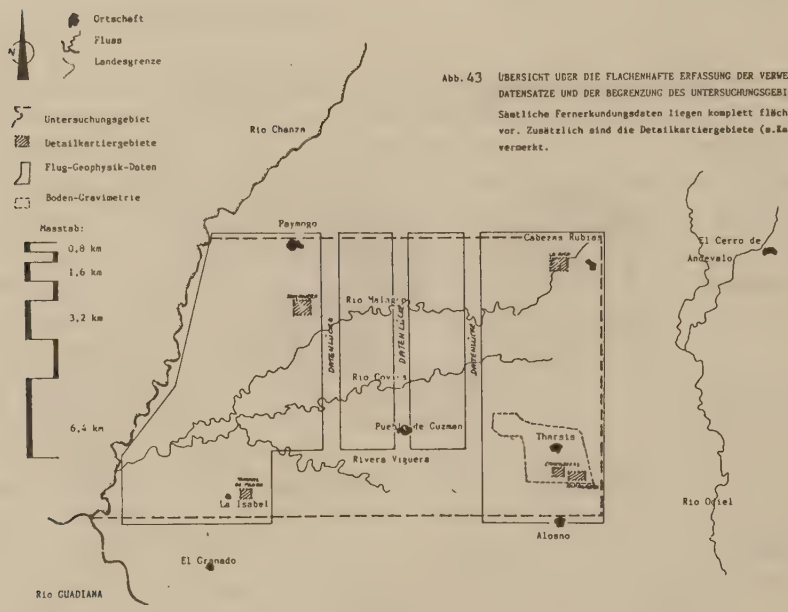


Abb. 43 ÜBERSICHT ÜBER DIE FLÄCHENHAFTE ERFASSUNG DER VERWENDETEN DATENSÄTZE UND DER BEGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES

Sämtliche Fernerkundungsdaten liegen komplett flächendeckend vor. Zusätzlich sind die Detailkartiergebiete (s.Kap. V) vermerkt.

2.2.1.1. Elektromagnetik

Sulfidische Erzkörper, Graphit, Magnetit und grundsätzlich alle Materialien die elektrisch gut oder auch besonders schlecht leitend sind, lassen sich durch ihren Widerstandskontrast von anderen Gesteinen prinzipiell durch elektromagnetische Induktionsverfahren nachweisen.

FRASER (1978) stellte mit MULTICOIL II ein bereits seit 1974 bei der BGR in Erprobung befindliches, verbessertes helikoptergetragenes EM - System vor, das zwei zueinander orthogonale Erreger- und drei orthogonale Empfängerspulen in einem Träger integriert. Dadurch wird eine induktive Ankoppelung sowohl an steilstehende als auch flachliegende Leiter erreicht. Rohdaten werden geglättet, auf ein Nullniveau bezogen und nach einer Driftkompensation in ppm (bezogen auf die Stärke des Primärfeldes) umgeeicht. Real- und Imaginärteilkomponente des Feldes werden in zwei Parameter eines leitenden Halbraumes unter der Flugsonde transformiert. Es sind dies der scheinbare spezifische Widerstand (ϱ_s) und die scheinbare Tiefe eines Störkörpers bei nicht abschirmender leitfähiger Deckschicht. Die Messfrequenzen von 882 und 918 Hz für beide Sendespulen erlauben die Trennung der Empfangssignale, durch die geringe Differenz ist eine mathematische Gleichbehandlung möglich. Bemerkenswert ist der geringe Störpegel des horizontalen Spulenpaares, es liefert nur gering verrauschte Daten.

Das MULTICOIL II System (im Handel als: DIGHEM, DIGital Helicopter ElectroMagnetics) hat seine Hauptanwendung in der Detektion von massiven und disseminierten Sulfiderzkörpern und Grundwasservorkommen. Mit einer seit 1979 eingeführten Erweiterung des Frequenzbereiches auf 3600 Hz sind bei der BGR neuerdings auch Widerstandskartierungen bis zu größeren scheinbaren spezifischen Widerständen (größer 100 Ωm) durchführbar. Die erhaltenen elektromagnetischen Daten sind so detailliert, daß mit den Flugwegprofilen auch eine Einzelanomalie - Auswertung durchführbar ist. Grundlage sind Untersuchungen über die Felder von Modell - Störkörpern (FRISCHKNECHT, 1967). FRASER (1975,1978) und SENGPIEL (1980,1983) entwickelten Verfahren zu qualitativen und quantitativen Analysen der MULTICOIL - Daten und zeigten deren Zuverlässigkeit an mehreren Beispielen.

Thematischer Informationsgehalt:
Die EM - Daten lagen für diese Bearbeitung in Form von Isolinienkarten des scheinbaren spezifischen Widerstandes und der scheinbaren Tiefe leitfähiger Körper unter Grund im Masstab 1:12500 vor (s.a.Anhang 4). Um die Zuverlässigkeit dieser Daten für die Übersichtsexploration auf Kieserze abschätzen zu können, wurde eine visuelle Kontrolle und Vergleich mit geologischen Einheiten und bekannten Vererzungen vorgenommen.
Scheinbare spezifische Widerstände mit berechneten Werten zwischen 100 und 32 Ωm fallen in vielen Fällen mit Schwarzschiefervorkommen, Gossans und mächtigen Halden zusammen. Deutliche Anomalien (kleiner 32 Ωm) sind korrelierbar mit:

--- massiven und disseminierten Kieserzkörpern (Filon Norte, Almagrera, Lagunazo, Prado Vicioso, bis 0.2 Ωm)
--- Ortschaften, Erzbahn (Tharsis, Alosno, bis 1 Ωm)
--- Hochspannungsleitung (50000 V 50 Hz, bis 18 Ωm)

Die Stauseen Lagunazo, Embalse Grande, ebenso wie Fluß- und Bachbetten verursachen trotz gut leitfähigen, tonigen Bodenschlammes nur unbedeutende Widerstandsanomalien (um 100 Ωm). Dies gilt ebenfalls für flache Haldenüberdeckung und demonstriert eine wirkungsvolle Durchdringung der leitfähiger Oberflächenschichten. Einige, vor allem schwache Anomalien (100 bis 32 Ωm) lassen ihre Ursache nicht sicher erkennen.
Zum Widerstandskontrast zwischen Erz und Nebengestein existieren Informationen aus dem Testgebiet und dessen Umgebung aus zwei Arbeiten. Nach STRAUSS et al.(1977) und FERNANDEZ ALVAREZ (1975) gelten (Tab.4 S.84).
Die Kieserze und Schwarzschiefer zeigen danach zu den umgebenden vulkanogenen und sedimentären Gesteinen einen ausreichend hohen Widerstandskontrast. Da die Schwarzschiefer in unmittelbarer Nähe und genetischer Beziehung zum Erz auftreten, kann über sie auf mögliche Erzfazies prospektiert werden.
Aus den Vorkommen kleiner und kleinster Vererzungen und Erzkörper S Tharsis und den vorliegenden EM - Karten konnte eine Abschätzung der räumlichen Auflösung einzelner Anomalien vorgenommen werden. Diese beträgt weniger als 50 m in und etwa 150 m senkrecht zur Flugrichtung für Teufen um 20 m.

Serien	STRAUSS et al.(1977)	FERNANDEZ ALVAREZ (1975)
TG	150 - 300	100 - 600
VK: Sedimente, Tuffe	150 - 300	---
saure Vulkanite	200 - 1000 - 2000	500 - >1000
bas. Vulkanite	250 - 1000	500 - >1000
Kieserze	<0.01 - 1.0	mass.Pyrit <0.1 - 1.0 Melierterze 8 - 50
Schwarzschiefer	10 - 50	10 - 80
TQ	250 - 1000	---

Tab.4 Spezifische Widerstände (in Ωm) für Gesteine des Kiesgürtels nach STRAUSS et al.(1977) und FERNANDEZ ALVAREZ (1975)

Die "Eindringtiefe", also in etwa die Teufe, in der ein massiver Erzkörper noch sicher nachweisbar ist, hängt stark vom ϱ_s des Nebengesteins, einer möglichen mächtigen Maskierung durch leitfähige Deckschichten und dem Volumen und Reinheit des Erzes ab. FRASER (1979) berichtet von einer Größenordnung von mehr als 100 m unter den Bedingungen des kanadischen Schildes. Für den Kiesgürtel dürfte die Nachweistiefe für wirtschaftlich interessante Erzkonzentrationen bei maximal 50 bis 70 m liegen (aus dem Vergleich bekannter Vorkommen und den EM - Daten). PARASNIS (1975) gibt als theoretische Eindringtiefe d für einen homogenen Halbraum die Beziehung:

$$d = 503{,}8 \cdot \sqrt{\varrho_s / f}$$

(ϱ_s scheinb. spez. Widerstand in Ωm)
(f Messfrequenz in Hz, d in m)

Bei einer Frequenz von 900 Hz (Mittel aus beiden Messfrequenzen) ergibt sich:

$$d = 16{,}8 \cdot \sqrt{\varrho_s}$$

Nach einer mündlichen Mitteilung von SENGPIEL erlaubt die langjährige Erfahrung mit dem MULTICOIL II System die Abschätzung einer effektiven Erkundungstiefe nach:

$z^* \leqslant d/2$ und damit für 10 Ωm ----> 26 m
100 Ωm ----> 84 m

Tatsächlich sind Erzkörper, deren Oberkante bei 20 bis 40 m unter der Oberfläche auskeilen, noch nachzuweisen (Almagrera, Lagunazo)

Wie detailliert die EM - Daten die Lage und Ausdehnung von Massiverzen lokalisieren können, demonstrierte SENGPIEL (1983) an zwei Erzkörpern S Tharsis (Abb. 44,S.85).

Abb.44 Isolinien des scheinbaren spez. Widerstandes ϱ_s (Ωm), Erzkörper von Almagrera, aus SENGPIEL (1983), mit Fluglinien und Oberkante der Erzkörper

Die Karten der scheinbaren Tiefe weisen berechnete Werte (unter Geländeoberfläche) nur in Bereichen niedrigerer Widerstände als 100 Ωm nach. SENGPIEL belegte zwar am Beispiel Almagreras die Zuverlässigkeit der Kartierung einer scheinbaren Tiefe eindrucksvoll, sie ermöglichte in diesem Fall sogar die annähernde Rekonstruktion der Struktur und Lage der Erzkörper. Für die meisten anderen Anomalien aber, die einem einfachen 2-Schichtenmodell (oben: große ϱ_s, unten: kleine ϱ_s) nicht genügen, ergeben sich keine sinnvollen Tiefenangaben. Da außerdem die Wirkungstiefe recht beschränkt erscheint, werden über die scheinbare Tiefe keine wichtigen Informationen für die Übersichtsexploration vermittelt. Es erschien vielmehr notwendiger, Kriterien für eine qualitative Beurteilung der Widerstandsanomalien zu finden, da diese häufig anthropogene Ursachen haben. Die Daten der scheinbaren Tiefe wurden daher nicht weiter berücksichtigt.

Insgesamt scheinen die EM - Daten nach einer Korrektur auf "künstliche" Phänomene aber gut geeignet, als Informationsquelle für lithologische Widerstandsanomalien in mittlere Teufen zu dienen.

2.2.1.2. Magnetik

Bei magnetischen Verfahren werden lokale Abweichungen des geomagnetischen Erdfeldes gemessen. Die Anomalien werden durch unterschiedliche Intensität und Richtung der Gesteinsmagnetisierung hervorgerufen. Sie hat ihre Ursache zum Einen in der induzierten Magnetisierung durch das heutige Erdfeld, zum Anderen in einer permanenten Ausrichtung magnetischer Domänen aus geologisch zurückliegenden Epochen mit evtl. veränderter Erdfeld - Richtung (remanente Magnetisierung). Dabei müssen tektonische Rotationen berücksichtigt werden.

Die Intensität der induzierten Magnetisierung hängt in erster Linie von der magnetischen Suszeptibilitat ab, sie ist definiert als:

$$\vec{M}_i = K \cdot \vec{H}$$

K = Suszeptibilität pro Volumen
$\vec{M}_i$ = induzierte Magnetisierung
$\vec{H}$ = induzierendes Feld

Remanente Magnetisierung ist nachweisbar in Sedimenten, die entweder ferrimagnetische Partikel eingebettet enthalten und so alte Feldrichtungen konservierten und in Gesteinen, die im Erdfeld von Temperaturen oberhalb des Curiepunktes ferrimagnetischer Verbindungen abkühlten. Da fast alle Anomalien im Testgebiet sich durch das heutige, induzierende Erdfeld erklären lassen, wird der remanenten Magnetisierung eine untergeordnete Bedeutung beigemessen.

Die Magnetikdaten des Testgebiets wurden mit einem Protonen - Präzessionsmagnetometer GEOMETRICS G 803 bei einer Messgenauigkeit von +1 nanoTesla (nT) erhoben. Gemessen wurde die Totalintensität des Magnetfeldes. Eine ausführliche Beschreibung von Messvorgang, Funktionsweise der Messgeräte und Datenaufbereitung findet sich bei HOOD et al.(1977). Die Magnetikrohdaten wurden nach einer Filterung, um hochfrequente Störsignale zu unterdrücken, von den zeitlichen Variationen des Erdfeldes und vom Beitrag des regionalen Magnetfeldes befreit. Kreuzungspunktdifferenzen zwischen Mess- und Kontrollprofilen dienen der Kontrolle bestimmter Messfehler und der Flugwegrekonstruktion.
Die horizontale Störkörperauflösung kann nach BOSUM (1981) über die mittlere Flughöhe ü.Gr. abgeschätzt werden, beträgt etwa 70 m in Flugrichtung. Er weist auch nach, daß die Form von Anomalien (im 2-dimensionalen Fall) annähernd richtig wiedergegeben wird, wenn die Tiefe der Störkörperoberkante zur Geländeoberfläche kleiner als der Profilabstand ist. Man kann daher im vorliegenden Fall von einer zutreffenden Wiedergabe bis zu 130 m Teufe sprechen.

Thematischer Informationsgehalt:
Die Magnetisierung kann mit dem Gehalt an folgenden Mineralen weitgehend korreliert werden:

abnehmende Suszeptibilität (nach TELFORD et al.1976)

--- Magnetit
--- Titanomagnetit
--- Magnetkies
--- Hämatit,Chromit

Die ersten drei Minerale stellen wohl die häufigste Ursache für magnetische Anomalien in Gesteinen dar. Allgemein sind in der Regel mafischere Gesteine durch ihren höheren Erzgehalt deutlich magnetischer. Mittlere Suszeptibilitäten für die Gesteine im Kiesgürtel geben STRAUSS et al.(1977), Werte für Proben aus dem Untersuchungsgebiet wurden mit einem Kappameter selbst ermittelt (Tab. 5 S.87).
Bedeutsam erscheinen die geringen Werte der meta-Basalte in den eigenen Messungen, tatsächlich belegen auch die aeromagnetischen Karten des BGR über deren kartierten Vorkommen im Testgebiet keine signifikante Anomalie. Eine der heutigen induzierten Magnetisierung entgegenwirkende Remanenz kann nach Tab.5 ausgeschlossen werden. Betrachtet man die kartierten Anomalien, dann liegen alle mit einer Dynamik von mehr als 50 nT (Gesamtdynamik der Daten: 460 nT) im Bereich des südlichen oder nördlichen VK-Zuges.

Serien	Magnetische Suszeptibilität nach STRAUSS et al. in 10-6 (c.g.s.)	Magnetische Suszeptibilität eig. Messungen* in 10-6 (c.g.s.)	Remanenz eig. Messungen* in 10-5 (Gauss)
TG:	20 - 60	5 - 10	0
VK:			
Sedimente, Tuffe	20 - 850	10 - 20	0 - 1
saure Vulkanite	20 - 60	5 - 20	0 - 1
intermed. Vulk.	---	30 - 800	1 - 70
basische Vulk.	200 - 8000	50 - 70	1 - 5
Kieserze	60 - 3700	20 - 130 (F.Norte)	1 - 5
Schwarzschiefer	20 - 60	10 - 25	0 - 1
TQ:	20 - 60	5 - 10	0

Tab.5 Magnetische Parameter der Gesteine im Untersuchungsgebiet und seiner Umgebung, nach STRAUSS et al.(1977) und eigenen Daten
*=27 repräsentative Proben aus dem gesamten Testgebiet

Für einige der bedeutendsten konnten an Hand der Profildaten zweidimensionale Störkörper mit einem Simulationsprogramm am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik gerechnet werden. Eine Anomalie S Paymogo zeigte dabei die Übereinstimmung des gerechneten Störkörpers mit einem im Gelände kartierten, magnetithaltigen meta-Dazit - Körper (s.a.Tab.5, höchste Werte der eigenen Messungen). Bei Herrerias war eine große Anomalie nach einer Kurvenanpassung mit einem Störkörper zu erklären, der sowohl in Dimension, Magnetisierung (gemessen an Erzen der Grube: $50\text{-}220 \cdot 10^{-5}$ Gauss) und Lage mit der Erzfazies und dem eigentlichen Erzkörper übereinstimmt (Abb.45 S.88). Eine sehr kleine Anomalie ist noch im W - Teil des Filon Norte Erzkörpers zu sehen, es könnte sich dort um Melierterze mit einer schwachen Magnetisierung handeln. Die massiven Pyriterze bei Tharsis sind dagegen unmagnetisch (Filon Norte, Lagunazo, Almagrera u.a.).

Einige der Erzkörper im Pyritgürtel und die zugehörige Erzfazies weisen höhere Gehalte an magnetischen Erzmineralen auf. Von Cueva de la Mora NE Tharsis berichtet PINEDO VARA (1963) Magnetkiesgehalte bis zu 20%, auch andere Vorkommen haben beträchtliche Anteile. Für das Testgebiet ist dies nur für Herrerias nachgewie-

sen. Eine Exploration auf neue Vorkommen sollte aber eine solche zusätzliche Information trotz ihrer Mehrdeutigkeit einbeziehen, kann doch durch Kombination mit anderen Daten die Sicherheit einer positiven Aussage erhöht werden. Außerdem sind mit der Magnetik die größten Wirktiefen zu erzielen und dadurch eventuell auch Großstrukturen des VK unter TG - Bedeckung zu entschlüsseln.

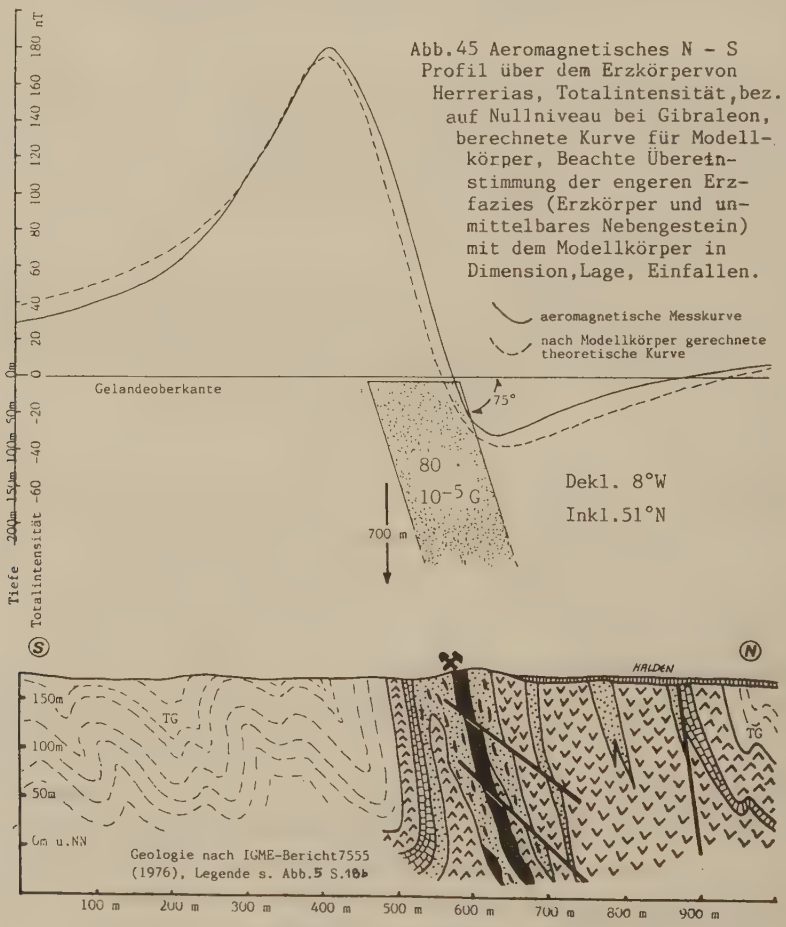


Abb.45 Aeromagnetisches N - S Profil über dem Erzkörpervon Herrerias, Totalintensität, bez. auf Nullniveau bei Gibraleon, berechnete Kurve für Modellkörper, Beachte Übereinstimmung der engeren Erzfazies (Erzkörper und unmittelbares Nebengestein) mit dem Modellkörper in Dimension, Lage, Einfallen.

2.2.1.3. Gamma - Spektrometrie

Gammastrahlung ist hochenergetische elektromagnetische Strahlung, die im Frequenzbereich von 10^{18} -10^{22} Hz von bestimmten angeregten Atomkernen emittiert wird. Die Energien dieser Photonen variieren zwischen 10^4 und 10^7 eV (verglichen etwa mit 2-3 eV beim sichtba-

ren Licht). In den Materialien der Erdkruste entsteht Gammastrahlung hauptsächlich bei drei Prozessen:

--- Emission beim ^{40}K - Zerfall (0.12% des Gesamt-K)

--- Emission durch Zerfallsprodukte der ^{238}U - Reihe

--- Emission durch Zerfallsprodukte der ^{232}Th - Reihe

^{40}K emittiert Strahlung bei 1,46 MeV, für die U- und Th - Zerfallsreihen ist das Spektrum sehr komplex und umfasst Bereiche von 0,1 bis 2,6 MeV. Bei aerospektrometrischen Untersuchungen wird üblicherweise in folgenden energetischen "Fenstern" gemessen:

Element	Isotop	Gamma-Energie in MeV	energetisches Fenster in MeV
Kalium	^{40}K	1,46	1,37 - 1,57
Uran	^{214}Bi	1,76	1,66 - 1,86
Thorium	^{208}Tl	2,62	2,41 - 2,81
(Total Count)	---	---	0,41 - 2,81

Tab.6 Energetische Fenster der gebräuchlichen Gamma - Kanäle nach GRASTY, (1977)

Da die nachweisbaren Isotope des jeweiligen Zerfallsprozesses sich dem Gesamtgehalt der nachzuweisenden Elemente weitgehend proportional verhalten, ist die Gammaaktivität ein direktes Maß für den Gehalt an diesen Elementen (KOGAN et al. 1969, GRASTY 1977). Voraussetzung für diese Korrelation sind allerdings systematische Korrekturen der Rohdaten.

Die Daten für das Testgebiet lieferte das System EXPLORANIUM DiGRS-3001, als Detektoren fanden dabei 4 NaJ Kristalle mit einem Gesamtvolumen von 7,4 l Verwendung. Gemessen wurde in Impulsen pro Sekunde (cps). Nach einer Filterung, um die statistische Streuung zu unterdrücken, wurden aus den Rohdaten der Compton - Effekt eliminiert und die Daten rechnerisch auf eine konstante Flughöhe bezogen. Dies ist besonders wichtig, weil die Intensität der Strahlung in Materie (Luft) mit der Entfernung exponentiell abnimmt und so kleine Abstandsänderungen beträchtliche Intensitätsschwankungen hervorrufen. Über Kontrollprofile wurden weitere Korrekturen der Flugliniendaten vorgenommen und schließlich in ein digitales Flächenmodell eingepasst.

Für Photonen mit Energien von 1 - 3 MeV gilt als Halbwertsdicke in Gestein 4 - 8 cm, in Luft etwa 85 - 150 m. Diese Größe beschreibt die Wegstrecke, nach der im jeweiligen Material nur noch die Hälfte der von einer Quelle ausgehenden Strahlung nachgewiesen werden kann, der restliche Anteil geht durch Absorption und Streuung verloren. Für Gesteine mit geringen Gehalten an K,U,Th gilt demnach, daß Befliegungen in Höhen von einigen Hundert m und darüber keine sinnvollen Daten liefern, desgleichen kann ledig-

lich auf die Aktivität der obersten Bodenschichten geschlossen werden. Messflüge mit verschiedenen Systemen wiesen eine Wirktiefe von 10 bis 30 cm bei Flughöhen von 50 bis 100 m nach (GRASTY, 1977).

Thematischer Informationsgehalt:
Aus dem Studium der Literatur zur spektrometrischen Exploration auf sulfidische Erze ergeben sich zwei thematisch interessante Ansätze:

--- Analyse auf hohe Th/U - Verhältnisse, infolge relativ hoher primärer Gehalte in einigen sulfidischen Erzen (verglichen mit dem Nebengestein) und der Abfuhr des weniger ortsstabilen U durch Verwitterungsvorgänge (KOGAN et al., 1969).

--- Analyse auf hohe K/Th - Verhältnisse, infolge K - Anreicherung gegenüber Erzmineralien in komplexen, hydrothermal geprägten Sulfidvorkommen (porphyry - Typ, vgl. ROWAN&LATHRAM, 1980).

Obwohl Letzterer den erzgenetischen Vorstellungen im Kiesgürtel nicht entspricht, so scheint doch eine Betrachtung dieser Möglichkeit wegen des Auftretens K-reicher Gesteine in der Nähe der Erzfazies gerechtfertigt.
Eine Berechnung des Th/U - Ratios ergab eine so hohe Korrelation zwischen beiden DS (Th,U), daß Anomalien erst im Bereich der Messgenauigkeit auftreten, also von keiner praktischen Bedeutung sind (Anhang 6). Tatsächlich wies dann auch der visuelle Vergleich mit bekannten Vorkommen keinerlei Übereinstimmung mit den berechneten Anomalien auf. Für Erze des Testgebiets liegen keine geochemischen Bestimmungen auf Th und U vor, sie dürften sich jedoch gegenüber dem Nebengestein als nur geringfügig erhöht ergeben. Selbst exponiertes Erz (Filon Norte, Herrerias, Cabezas del Pasto) zeigt keine erhöhten Messwerte in der γ - Spektrometrie.

Betrachtet man das Verhältnis K/Th, so erscheinen deutliche Unterschiede in der K- und Th - Aktivität. Die Verarbeitung wurde aus digitalen Rasterdaten mit dem Bildverarbeitungssystem SWING realisiert. Der nördliche VK - Zug weist fast durchgehend niedrigere Ratiowerte, der südliche höhere als die TG - Serien auf.

Anomalien mit außergewöhnlich hohen Werten (höhere K/geringere Th) sind häufig, aber nicht zwingend mit bekannter Erzfazies zu korrelieren.

Als interessanter erweisen sich die Daten für lithologische Parallelisierungen, also für `indirekte' Hinweise in Bezug auf Vererzungen. Betrachtet man die in Kartenform gebrachten Messdaten (Anhang 4), so zeigen Th,U und K - Werte auffallende Zusammenhänge mit der geologischen Karte. U verhält sich dabei zu Th völlig kongruent (wie schon die Ratio - Bildung ergab). Durch ihre größere Dynamik und geringere Störsignalbeeinflußung (Radon im U - Fenster) scheinen die Th - Daten für eine weitere Bearbeitung interessanter zu sein. Bei den Th - Werten haben alle meta-Basalte und viele meta-Andesite (S Paymogo, N Lagunazo, W San Isabel) Minima kleiner als 10 cps, dagegen die dazitischen und rhyolitischen Vulkanit - Züge deutlich erhöhte Strahlungswerte größer als 20 cps (Abb.46). Die sedimentären Serien des TQ,VK und TG verhalten sich unsignifikant mit 10 bis 20 cps.

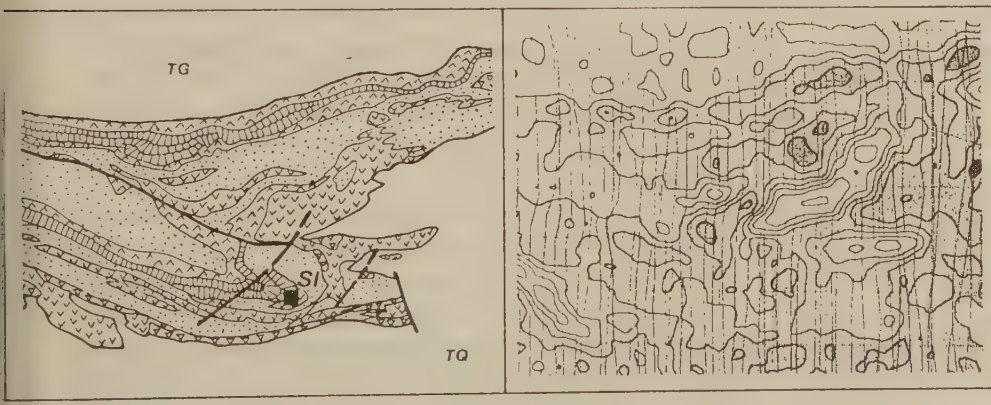


Abb. 46 Vergleich der geologischen Karte (Abb. 5 S. 18, SW-Teil) mit γ-radiometrischen Flugmessungen im Th-Fenster
meta-Rhyolithe,-Rhyodazite. hellste Flächen 2.5 cps und Isolinienabstand von 2.5 cps
meta-Andesite,-Dazite dunkle Flächen 20 cps, gepunktete Linien: Flugrouten;
meta -Basalte nach einer Karte dergeophysikalischen Abteilung BGR
alle weiteren Signaturen siehe Abb. S.
1 2 km

Beachte Korrelation der γ-Intensität mit dem SiO_2-Gehalt der meta-Vulkanite, etwa N und NE San Isabel

Bei K ergibt sich ebenfalls eine Korrelation von SiO_2 - Gehalt der Vulkanite und den Messwerten, allerdings weniger scharf ausgeprägt. In Bereichen saurer und intermediärer Serien des VK sind Maxima mit bis über 100 cps vorhanden und dokumentieren nach Geländebeobachtungen lokale Laven- und Tuffkörper mit deutlich

erhöhtem Orthoklas- bzw. Serizitanteil (nachgewiesen W Tharsis, S Paymogo, SW Cabezas Rubias). Bemerkenswert ist dabei, daß die drei genannten Lokalitäten in unmittelbarer Nähe bekannter und z.T.größerer Erzvorkommen liegen. Bei Herrerias ist ein solches Verhalten nicht festzustellen.
Mittlere Radioelement - Konzentrationen in Vulkaniten bestätigen die Korrelation für Lithologie und Th, U - Gehalte (Tab.7):

Rock Class	U (ppm)		Th (ppm)		K (%)	
	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Acid Extrusives	4.1	0.8 - 16.4	11.9	1.1 - 41.0	3.1	1.0 -6.2
Acid Intrusives	4.5	0.1 - 30.0	25.7	0.1 -253.1	3.4	0.1 -7.6
Intermediate Extrusives	1.1	0.2 - 2.6	2.4	0.4 - 6.4	1.1	0.01-2.5
Intermediate Intrusives	3.2	0.1 - 23.4	12.2	0.4 -106.0	2.1	0.1 -6.2
Basic Extrusives	0.8	0.03- 3.3	2.2	0.09- 8.8	0.7	0.06-2.4
Basic Intrusives	0.8	0.01- 5.7	2.3	0.03- 15.0	0.8	0.01-2.6
Ultrabasic	0.3	0 - 1.6	1.4	0 - 7.5	0.3	0 -0.8

Tab.7 Mittlere Gehalte und Dynamik an Radioelement-Konzentrationen in Gesteinen aus: KILLEEN (1977)

Besondere Bedeutung erhalten diese Zusammenhänge durch die Möglichkeit, flächenhaft geschlossene und unter einheitlichen Kriterien erfasste lithologische Informationen aus den für die Exploration wichtigen vulkanischen Serien zu erhalten, und dies ohne wesentliche Beeinflussung durch Vegetation und durch den obersten Bodenhorizont hindurch.
Beide Ratios sind thematisch weitgehend uninteressant, als sie keine neuen Aspekte zur `direkten' und `indirekten' Exploration liefern. Die DS K und Th hingegen bieten lithologische Informationen über das Umfeld der Erzfazies und stellen damit einen wichtigen Beitrag zur Findung von Entscheidungskriterien. Können beide DS in einer Darstellung kombiniert werden, ohne daß der Informationsgehalt jedes einzelnen DS darunter leidet, wäre dies eine optimale Form für eine thematische Auswertung. Denn so könnten dann nicht nur extreme Verhältnisse der beiden Elemente beurteilt, sondern auch quantitative Aussagen gemacht werden.

2.2.2. Bodenmessungen

Für einen Ausschnitt des gesamten Testgebiets sollten Referenzdaten zu den thematisch wichtigen EM - Informationen in möglichst detaillierter Form vorliegen. Nach STRAUSS et al.(1977) eignen sich dafür gravimetrische Daten vorzüglich. Sie wurden im Auftrag

der Ca. Tharsis S.A. aufgenommen und dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

2.2.2.1. Gravimetrie

Gesteine mit unterschiedlichen Dichten verursachen geringe Änderungen des Schwerefeldes der Erde (in der Größenordnung von 10^{-8} bis 10^{-4} des Gesamtschwerefeldes).

An den Rohmesswerten sind Korrekturen für die Änderung des Schwerefeldes mit der Höhe und Breite durchzuführen. Weiterhin ist der Einfluss der Topographie und der Massen zwischen Messpunkt und einem Bezugsniveau zu berücksichtigen. In der Regel werden Bouguer - Anomalien berechnet, sie enthalten nur noch die Schwerewirkung von Gesteinskörpern verschiedener Dichte unterhalb eines horizontalen Bezugsniveaus.
Bei der Benützung von entsprechend sensiblen Messgeräten und einem engen Messlinien - Raster, können Dichtekontraste bis zu wenigen Zehntel g/cm^3 in Gesteinen auch in größeren Teufen bestimmt werden. Schwereanomalien werden in Milligal (mgal) gemessen, ein gal ist die c.g.s.-Einheit für die Beschleunigung ($1cm/s^2$).
Im Jahr 1973 wurde ein Gebiet von ca. 40 km^2 um Tharsis gravimetrisch vermessen. Mit einem Gravimeter WORDEN PROSPECTOR 894 ermittelte man durchschnittlich alle 70 m auf Messlinien im Abstand 100 - 300 m die Werte. Die Geräteempfindlichkeit betrug 0,1 mgal. Ein regelmäßiges Gitter beschränkte sich auf die unmittelbare Umgebung des Filon Norte, alle Messlinien streichen ca. 25°. Nach einer Korrektur auf Bouguer - Schwereunterschiede konnten die Daten zu einer Isolinienkarte im Masstab 1:5000 zusammengestellt werden. Der Isolinienabstand beträgt 0,2 mgal.

Die Tiefenauflösung für Störkörper beträgt nach SMITH (1959) unter Annahme eines deutlich positiven Kontrastes zwischen Zielkörper und Nebengestein:

$$h \leqslant \frac{0{,}86 \cdot \Delta g_{max}}{\Delta g'_{max}}$$

Δg_{max} = max. Wert der Anomalie
$\Delta g'_{max}$ = horizontaler Gradient
h = maximal mögliche Tiefe

Sie hängt also stark vom Gradienten und den absoluten Maxima der Anomalien ab. Für großräumige Änderungen, etwa N Tharsis ergibt sich damit h = 1000 m, für typische Erzkörper - Anomalien (Almagrera, Nueva Almagrera, Cantareras, alle S Tharsis) dagegen h = 140, 40, 80 m respektive. Allgemein gilt wohl, daß bei Vorkommen in der Größenordnung bis 5 mio t mit einer deutlich erkennbaren Anomalie bis 100 m, bei größeren wohl auch bis 300 m Tiefe gerechnet werden kann.
Die horizontale Trennung begrenzter Störkörper kann man an den vorliegenden Daten abschätzen. So ist bei kleinen Vorkommen in 50 - 100 m Teufe bei 100 m Abstand mit den vorliegenden Daten noch eine einwandfreie Trennung der Anomalien möglich (Almagrera/Nueva Almagrera und Filon Sur/Cantareras, alle S Tharsis).

Thematischer Informationsgehalt:
FERNANDEZ ALVAREZ (1975) und STRAUSS et al. (1977) geben mittlere Dichten für Gesteine aus dem Untersuchungsgebiet und seiner näheren Umgebung an (Tab. 8):

Serien	Dichte nach STRAUSS et al. in g/cm3	nach FERNANDEZ ALVAREZ in g/cm3
TG	2,5 - 2,75	2,4 - 2,8
VK: Sedimente, Tuffe	2,5 - 2,75	2,4 - 2,8
saure Vulkanite	2,6 - 2,9	2,5 - 3,0
basische Vulk.	2,7 - 3,1	2,5 - 3,0
Kieserze	4,1 - 4,9	4,1 - 5,0
Schwarzschiefer	2,5 - 2,75	2,4 - 2,8
TQ	2,5 - 2,6	2,4 - 2,8

Tab. 8 Mittlere Dichten der Serien im Untersuchungsgebiet

Die Schwerekontraste der Kieserzkörper zu den umgebenden Vulkaniten und Sedimenten verursachen Anomalien bis zu 10 mgal (Filon Norte), auch kleinere bekannte Kieslager (Almagrera, Cantareras) zeigen noch bis zu 1 mgal positive Abweichungen vom Hintergrund (Abb. 47, vgl. auch Abb. 44, S. 85).

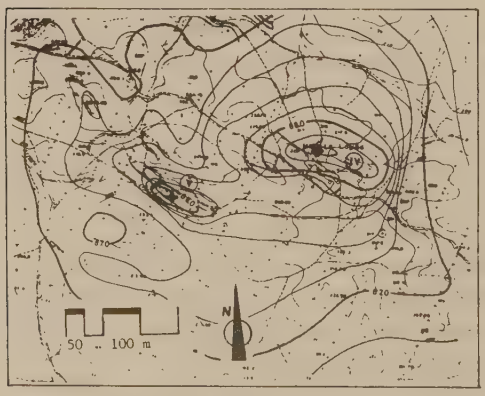


Abb.47
Bouguer - Anomalien der beiden Erzkörper von Almagrera, zur Lage der Erzkörper vgl. Abb.44, Isolinienabstand 0,2 mgal nach Unterlagen der Ca. Tharsis S.A.

Andere, diese großen Dichtedifferenzen aufweisenden Materialien sind nicht bekannt. Alle Anomalien mit steilen Gradienten können Vererzungen auch kleiner, unwirtschaftlicher Dimension zugeordnet werden. STRAUSS et al.(1977) berichten, daß selbst Vorkommen von

1-3 mio t auch in größere Teufen sicher nachweisbar sind. Im N des Untersuchungsgebietes nimmt die Dichte der oberflächennahen Gesteine großräumig ab, erkennbar an den parallel und ruhig verlaufenden, von 82 auf 78 mgal zurückgehenden Isolinien.

Detaillierte gravimetrische Aufnahmen stellen wohl eines der zuverlässigsten Explorationswerkzeuge dar, die im Kiesgürtel einsetzbar sind. Leider sind die Kosten pro Flächeneinheit sehr hoch und so lohnt sich ein Einsatz nur für begrenzte Areale, wo die Erfolgsaussichten durch kostengünstigere Verfahren schon als hoch eingeschätzt werden. GOCHT (1983) gibt hier Anhaltswerte, so kosten aerogeophysikalische Messungen 30-70, Boden-Magnetik und elektrische Verfahren 80-150 und die Gravimetrie 650 can$ pro Linien-km.

3. Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften und Informationsgehalte

In der Diskussion der thematischen Bedeutung einzelner DS für die Exploration zeigt sich bereits eine deutliche Reduktion auf sinnvolle Verwendungsmöglichkeiten. So wird eine spektrallithologische Kartierung mit den in ariden Klimaten sich dafür hervorragend eignenden MSS- und TM - Daten nur beschränkt möglich sein (Ausnahme: Gossans). Die MSS - Daten werden in ihren potentiell interessanten Eigenschaften von den Möglichkeiten der TM - Daten übertroffen (Strukturen und Texturen). TM und Luftbild haben durch ihre hohe räumliche Auflösung und aktuelle Oberflächeninformation eine wichtige Funktion als Korrektiv für die thematische Kontrolle und Interpretation geophysikalischer DS. Wichtig sind sie dabei als orientierende "Unterlage".
Flug - Geophysik gibt mit den EM - Daten die 'direktesten' Hinweise auf Erze und Erzfazies, allerdings mit beträchtlichen Möglichkeiten zur Fehlinterpretation. Die Aeromagnetik kann begrenzt benutzt werden, als direkte Methode eignet sie sich nur bei höherer Magnetisierung der Erzfazies. Zur Kartierung basischer Gesteine läßt sie sich erstaunlicherweise nicht benutzen. 'Indirekte' Hinweise, so auf die Lithologie der meta-Vulkanite, bieten die spektrometrischen Messungen. Von speziellem Interesse sind dabei die K und Th - Daten. Direkte Korrelationen zu Erzvorkommen sind nicht festzustellen. Eine detaillierte gravimetrische

Aufnahme ist wohl das zuverlässigste und direkteste Explorationswerkzeug, aber aus Kostengründen kaum für eine Übersichtsexploration einzusetzen.

Einen Überblick über die relativen Differenzierungseigenschaften der behandelten DS in Bezug auf die lithologischen Einheiten vermittelt Tab. 9 S.96a, die Angaben beziehen sich auf die Einschätzung der auf Grund dieses Kapitels angestellten Überlegungen und Untersuchungen. Die einzelnen Daten sind nützlich für:

--- TM -lithologische Informationen (Kanal 4,5,PC 1)
-oxidische Fe^{3+}-Mineralphasen (Doppelratio)
-Strukturinventar (Kanal 5, Pseudoplast)
-Großstukturen, Textur (Kanal 4)
-Orientierung, Korrektiv für andere DS (Kanäle 4,5)

--- MSS prinzipiell wie bei TM, werden aber in allen Ergebnissen von TM übertroffen.

--- LUFTBILD -Strukturinventar, indirekter Schluss auf die Lithologie (Lineamentauswertung)
-Orientierung, Korrektiv für andere DS

--- EM -Hinweise auf Erze und Erzfazies

--- MAG -Gesteine (Erze) mit höherem Magnetit, Titanomagnetit und Magnetkies - Anteil

--- GAMMA -lithologische Differenzierung der VK - Serien
-anomale K - Werte nahe der Erzfazies

--- GRAV -Detektion von Erzen (hoher Dichtekontrast)

Mit Ausnahme der Gravimetrie, wo Anomalien unmittelbar Erzkörper anzeigen und kaum andere verursachenden Faktoren vorliegen, können alle anderen DS nur mittelbar und nach Einbeziehung anderer Informationen für Explorationszwecke genutzt werden. Dann ergeben sich allerdings durch die weitgehende Unabhängigkeit der verschiedenen Messergebnisse und ihren partiellen Bezug zur Erzfazies Möglichkeiten zur Informationsverdichtung. Kombinationen und Vergleiche der thematisch interessanten, z.T. aufbereiteten DS müssen unter Berücksichtigung der verschiedenen Aussagegehalte und Eigenschaften durchgeführt werden. Konzepte dazu soll das nächste Kapitel erarbeiten.

Tab.9 LITHOLOGISCHE UND THEMATISCHE INFORMATIONSGEHALTE DER DATENSÄTZE

Erkennbarkeit auf Grund von Merkmalen und Messwerten (+hoch,±mittel,-niedr,/unsicher ++sehr hoch,=sehr niedrig)

Schematischer Schnitt

SERIEN IM TEST-GEBIET / DATEN-SÄTZE (Merkmale)	TQ	VK Tonschiefer Tuffite	VK meta-Rhyol.	VK meta-Basalte	VK meta-Dazite -Andesite	VK Bit.-Schiefer	VK Gossan	VK Kieserze	VK Mn-Schiefer	TG
TM Kanal 5 (Reflektion)	+	/	/	±	±	/	+	/	/	+
TM 1.PC 3457 (Grauwert)	/	/	/	±	±	/	±	/	/	±
MSS 4/5//6/7 (Grauwert)	+	+	+	+	+	/	-	+	/	+
TM 3/4//4/5 (Grauwert)	+	+	+	+	+	±	=	+	±	+
TM Kanal 4 (Texturdiff.)	±	+	-	+	+	/	/	/	/	±
TM K.5-Psplast (Strukturdiff.)	±	+	-	-	-	-	-	-	-	±
Luftbild (Lin.dichte)	-	+	±	-	tlwse +	±	/	/	+	-
EM (spez.Widerst.)	+	±	+	+	/	-	/	—	±	+
Magnetik (Totalintens.)	-	-	-	±	tlwse +	-	/	(-bis+)	±	-
Spektrometrie (Th-Aktivität)	±	±	+	-	±	/	±	/	±	±
Spektrometrie (K-Aktivität)	-	-	+	-	+	/	±	/	±	-
Gravimetrie (Dichte)	-	-	±	±	±	-	/	++	-	-

IV. KOMBINATIONEN VON DATENSÄTZEN ALS INTERPRETATIONSOPTIMIERTE DARSTELLUNGEN

1. Konzeption interpretationsoptimierter Darstellungen

Flächenhafte Darstellungen von geowissenschaftlichen Informationen sind essentielle Grundlagen für die geologische Arbeit in der Exploration. Dabei zeigen Karten im Allgemeinen Vereinfachungen der ermittelten Originaldaten, etwa durch die Konstruktion von Isolinien oder begradigten Polygonbegrenzungen. Es sollen Möglichkeiten der bildhaften Darstellung solcher Daten diskutiert werden, die eine verbesserte Interpretation zulassen.

Ein weiterer wichtiger Schritt in der Explorationsarbeit besteht in der simultanen Beurteilung zweier oder mehrerer thematisch relevanter DS. Durch Kombinationen, die den ursprünglichen Informationswert noch erkennen lassen, wäre eine günstige synoptische Interpretationsgrundlage gewährleistet. Verschiedene Modelle sollen dafür getestet werden; ihre spezifischen Vorteile, Verwendungsmöglichkeiten und Einschränkungen. Am Ende dieses Kapitels werden konkrete Vorschläge für Kombinationen und Verarbeitungen der thematisch interessantesten DS des Testgebiets gemacht. Grundlage aller Überlegungen ist die Behandlung der DS als Bilddaten mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung.

1.1. Grundüberlegung: Rasterdaten statt Karten

Mehrere Gründe sprechen für eine einheitliche Festlegung aller flächenhaften Informationen auf digitales Rasterformat. Fernerkundungsdaten und ein Großteil der geophysikalischen Flugmessungen lagen bereits digital vor. Um also einen einheitlichen Standard für weitere Verarbeitungen zu erreichen, ist die Überführung der restlichen DS in eine digitale und gerasterte Form nötig. Außerdem werden manche Isolinien - Karten nach einem solchen Schritt synoptisch leichter verständlich und interpretierbar, dies wird noch gezeigt werden.
Gerade einige geophysikalische Daten (Magnetik, Gravimetrie) werden nicht nur ihren absoluten Werten nach beurteilt; relative Differenzen und Gradienten bergen oft massgebliche Aussagen. Grautonrasterbilder sind für deren Darstellung eine Möglichkeit.

Aber auch die absolute Beurteilung von Messwerten, wie etwa bei EM und Spektrometrie, könnte durch definierte Grauwerte deutlicher als in herkömmlichen Isolinienkarten unterstützt werden. BOLIVAR et al.(1982), O'CALLAGHAN&O'SULLIVAN (1982) und GUINESS et al. (1983) fanden, daß Fotoprodukte mit einer hochauflösenden Matrix aus interpolierten Einzelmessungen für eine Interpretation wesentlich unmittelbarer anschaulich und direkter zugänglich als Karten sind. Für diese Arbeit soll dies am Beispiel einer Karte der Gamma - Spektrometrie (Th) für einen Ausschnitt des Testgebiet demonstriert werden (Abb.48). Das linke Bild zeigt eine Isolinienkarte in cps, berechnet aus den Daten der Fluglinien, interpoliert und in ein Isolinienplot umgesetzt. Dasselbe Interpolationsraster (100 m Rasterzelle) wurde mit einer linearen Histogramm - Streckung der Messwerte auf die höhere Dynamik von 256 Grauwerten gegenüber 28 Stufen (cps) gebracht, um kleine Grauwertdifferenzen für das menschliche Auge besser sichtbar zu machen. Eine Abspielung auf Photomaterial weist somit schwarze Flächen für niedrige und weiße für hohe Th - Aktivität aus. Die unregelmäßige Begrenzung resultiert aus der Lage der Flugstreifen und zweier Datenlücken.

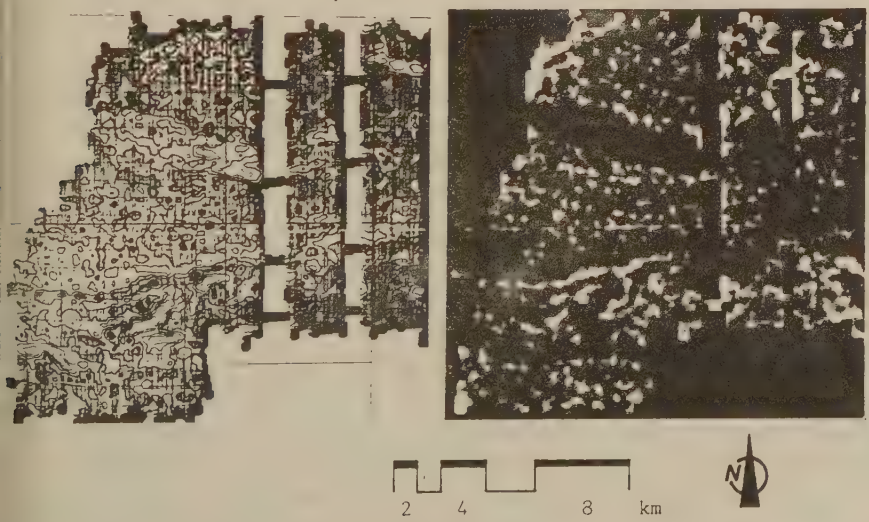


Abb.48 Darstellung der Th - Aktivität als Isolinienplot (links) und als Grauton - Rasterbild (rechts) für einen Ausschnitt des Testgebiets (100 m Raster, Isolinienabstand 2,5 cps)

Betrachtet man beide Darstellungen, so stellen sich einige Vorteile des Grauwert - Rasterbildes dar:

--- schwächere Maxima/Minima leicht zu unterscheiden
--- größerer Detailinformationsgehalt
(auch bei vorliegender dichter Isolinienabstufung)
--- Strukturen leichter verfolgbar
(optische Auslenkung des Auges entlang
der Isolinien nicht immer identisch mit
einer spektrometrischen Struktur)
--- Fluglinieneffekte ihrer Anordnung nach
besser zu erkennen

Dagegen wirkt sich negativ aus, daß das menschliche Auge nur wenige Graustufen differenzieren kann und so einige Details in den Extremwerten verloren gehen können. Hier muß die Kontrastverstärkung an thematisch wichtigen Eckwerten orientiert werden. Benutzt man aber die digitalen Rasterdaten als Ausgangspunkt für Methoden der Bildverarbeitung, um damit schließlich andere Formen der Datendarstellung zu erzeugen, so kann zumindest von einem leichten Gewinn an Interpretierbarkeit gegenüber Kartendarstellungen ausgegangen werden.

1.2. Optisch trennbare Informationsebenen

Digitale DS können auf verschiedene Art kombiniert und verknüpft werden. Für den Interpreten der entstehenden 'Produkte' ist es eine unabdingbare Forderung trotz der Möglichkeit einer Synopsis auch die oft sehr unterschiedlichen Informationsebenen in ihrem Informationsgehalt noch visuell trennen zu können.
So bieten etwa Farbdarstellungen dreier DS als additive Mischung der Farben Blau, Grün und Rot bei Teilüberlagerung nicht mehr die Gewähr, den Anteil der einzelnen Informationen abschätzen zu können. Das menschliche Auge kann eine Mischfarbe aus allen drei Komponenten kaum mehr in die einzelnen Anteile auflösen. Für die Darstellung spektraler Informationen aus Fernerkundungsdaten zur phänomenologischen Interpretation haben die additiven Farbdarstellungen gleichwohl große Bedeutung. Die additive Mischung ist ein Standardverfahren in der farblichen Darstellung thematisch ähnlicher DS (Falschfarbenbild, "ratio-composite" SEGAL, 1983).

Arithmetische Verknüpfungen wie Summen und Ratios erfüllen diesen Anspruch im Allgemeinen ebenfalls nicht. Es müssen also andere Verfahren verwendet werden, die eine Trennung der DS trotz Synopsis erlauben.

1.2.1. Kombination von DS via Synthetischem Stereo (SST)

BATSON et al.(1976), ZOBRIST et al.(1979), GILLESPIE (1980) und Haydn et al.(1982/1,2) beschreiben die Verwendung synthetischer Stereoeffekte zur Verknüpfung zweier unabhängiger Informationsebenen.

Die entscheidende Überlegung ist dabei, ein Stereobildpaar rechnerisch zu erzeugen, indem die Parallaxe der Bildpunkte (Pixel) eines DS durch die Intensität, also den Grauwert der Pixel des anderen kontrolliert wird. So werden jedem Pixel der neuen Bilder die Informationen der entsprechenden Pixel der Ausgangs-DS zugeordnet. Die neu berechneten Positionen eines Punktes x, der im SST die Intensität repräsentiert, ergeben sich aus den geometrischen Beziehungen zweier fester Beobachtungspunkte.

linkes SST Bild:

$$x_1 = p_1 + \frac{1}{1-\frac{h}{H}} \cdot (x-p_1)$$

rechtes SST Bild:

$$x_2 = p_2 - \frac{1}{1-\frac{h}{H}} \cdot (p_2-x)$$

x_1 neue Position von x im linken Bild
x_2 neue Position von x im rechten Bild
x alte Position eines Pixels des Intensitäts-DS
h Intensität des parallaxenkontrollierenden DS
H scheinbare Beobachtungshöhe (vereinfacht H=L)
L Anzahl der Pixel je Zeile
p_1 Nadir des Beobachtungspunktes Bild links (vereinfacht p_1=1/3L)
p_2 Nadir des Beobachtungspunktes Bild rechts (vereinfacht p_2=2/3L)
(y - Koordinaten werden nicht verändert!)

Als Resultat entsteht ein Synthetisches Stereobildpaar das die Informationen zweier unabhangiger DS vereinigt. Es zeigt unter dem Stereoskop ein simuliertes Relief, das synoptisch mit der Grauwert - Information betrachtet werden kann und gleichzeitig auch eine getrennte Auswertung erlaubt (Abb.49 S.101). Das Verfahren wurde bisher vor allem eingesetzt, um thermale Sensordaten, Oberflächentemperaturen oder auch digitale Höhenmodelle mit anderen Satellitendaten zu verknüpfen. Geophysikalische Daten können hier als Äquivalente thermaler FE - Daten aufgefasst werden.

SST - Bilder benötigen zur Auswertung die Benutzung eines Stereoskopes. In der Explorationspraxis werden allerdings verbreitet Stereoauswertungen von Luftbildern durchgeführt, daher kann davon

ausgegangen werden, daß weder bei Ausrüstung noch Benutzung Probleme entstehen dürften. Entscheidend ist, im Verständnis solcher SST - Bilder beim Interpreten eine Entkoppelung des Eindrucks topographischer Höheninformation vom beobachteten Relief zu erreichen.

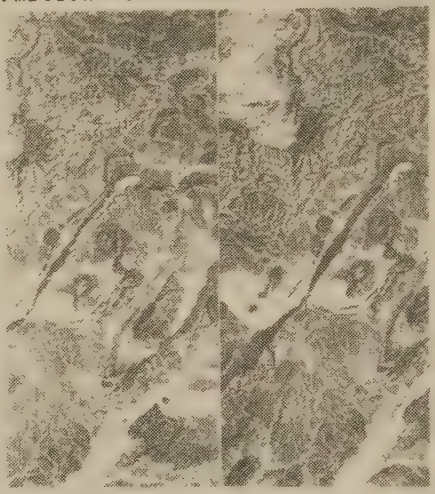
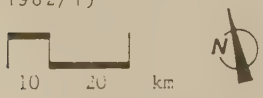


Abb.49 SST - Bildpaar, S-Marokko Antiatlas, Grauwerte: Landsat MSS Kanal 7, Parallaxe: Tag-Thermal Infrarot HCMM aus HAYDN et al. (1982/1)



1.2.2. Kombination von DS via arithmetischer Verknüpfungen hoch- und niederfrequenter Bilddaten

Alle arithmetischen Operationen zwischen zwei Größen verändern diese in einer Weise, daß vom Ergebnis kein Rückschluß auf die Ausgangsdaten möglich ist. Geht man von der Überlegung aus, daß manche DS durch grobes Raster und/oder Interpolation kein Pixelmuster mit stark wechselnden und steilen Gradienten enthalten (z.B. Lineamentdichte, s.Abb.41 S.79) und andere ausschließlich solches Verhalten zeigen (z.B. TM - Highpass, - Pseudoplast), so ließen sich nach geeigneten arithmetischen Verknüpfungen sicher noch die Ausgangsinformationen durch ihre Grauwertstextur auseinanderhalten. Abb.50 S.102 soll diese Überlegung für eine Addition zweier DS erläutern.

Die Addition (Subtraktion) hat gegenüber höheren Verknüpfungsarten den Vorteil, keine Verzerrungen in Amplitude und Frequenz der Originaldaten zu verursachen. Wichtig ist bei einem solchen Verfahren, daß die Frequenzen beider DS sich deutlich unterscheiden und keine extremen Amplituden auftreten.

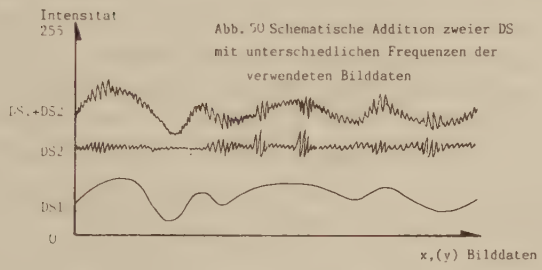


Abb. 50 Schematische Addition zweier DS mit unterschiedlichen Frequenzen der verwendeten Bilddaten

Die Methode kann als Umkehrung frequenzanalytischer Verfahren betrachtet werden, die versuchen komplexe Schwingungen in einfache Grundschwingungen zu zerlegen. Besonders wichtig ist bei der Berechnung einer solchen Kombination der kontrollierte Einsatz von Histogramm - Anpassungen, damit Extremwerte sowohl der Originaldaten als auch der summierten Daten nicht unterdrückt bzw. übertrieben werden.

1.2.3. Kombination von DS via Intensität, Farbfrequenz, Sättigung

Der Begriff "Farbe" steht im alltäglichen Gebrauch für den Gesamteindruck einer farbigen Oberfläche. Mehrere Verfahren erlauben eine quantitative Beschreibung einer "Farbe" in einem mathematischen Farbraum. Eine Möglichkeit besteht in der Abbildung als additive oder subtraktive Mischung spektral reiner Farben (CIE - Diagramm, BILLMEYER&SALTZMANN 1966). Diese Drei-Farb-Verfahren sind in der Photograpie, Drucktechnik und im Prinzip des Farbfernsehens realisiert. In der farblichen Darstellung von FE - Daten ist z.B. ein Falschfarbenbild ein typisches Produkt. Hier ist zwar eine synoptische Erfassung aller drei Kanäle gewährleistet, aber eine gleichzeitige getrennte Betrachtung der Einzelinformationen (Anteile von Rot,Grün,Blau) schwierig.

Ein anderes Modell beschreibt "Farbe" als verschiedene Anteile an Intensität (I), Farbfrequenz (engl. hue, H) und Sättigung (S) (vgl. auch SIEGAL&GILLESPIE, 1980).
Diese Begriffe werden dabei nicht in ihrer streng physikalischen Definition benutzt, sie beschreiben den physiologischen Farbeindruck des menschlichen Auges. Die Kurzform IHS ist üblich und wird folgend verwendet. Intensität steht dabei für die Summe der elektromagnetischen Energie, die von einem Objekt im sichtbaren

Teil des Spektrums abgegeben wird und entspricht dem Begriff Albedo in der Photogeologie. Rot, Grün, Lila sind bestimmte Farbfrequenzen, also Ausschnitte aus dem sichtbaren Spektrum und können bei hoher Sättigung als reine "Farben" bezeichnet werden. Die Sättigung schließlich beschreibt im IHS-System die Reinheit einer "Farbe". Je mehr Anteile anderer Farbfrequenzen an der "Farbe" beteiligt sind, umso weniger gesättigt, desto mehr pastellfarbig erscheint sie. Eine gesättigte "Farbe" ist demnach eine spektral reine "Farbe".

In einem kartesischen, additiven Drei-Farb-System (Rot,Grün,Blau, kurz RGB), in dem alle "Farben" verwirklicht sind, zeigt die Raumdiagonale keine "Farbe". Sie repräsentiert die Intensität (0 im Ursprung). Ein IHS - System kann man sich als Konus um diese Raumdiagonale vorstellen. An der Konusoberfläche läßt sich die Farbfrequenz festlegen, die Sättigung nimmt mit dem Abstand zur Raumdiagonalen zu (Abb.51).

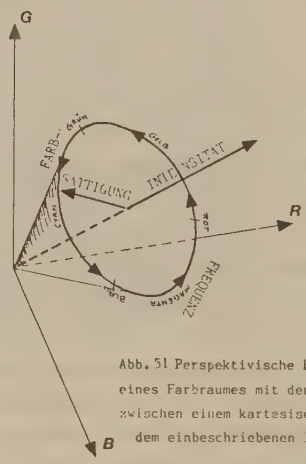


Abb. 51 Perspektivische Darstellung eines Farbraumes mit den Beziehungen zwischen einem kartesischen RGB- und dem einbeschriebenen IHS-System

HAYDN et al.(1982/1,2) schlagen vereinfachte Transformationen zwischen einem Drei-Farben (RGB) und einem IHS - System vor. Dies ist von Bedeutung, weil alle photooptischen und - mechanischen Prozesse bis zur Herstellung eines Photoproduktes nur auf einem Drei-Farb-Prinzip beruhen. Grundlage ist die Betrachtung der drei Komponenten Intensität, Farbfrequenz und Sättigung als arithmetische Beziehungen der Grauwerte eines Pixels für Rot, Grün und Blau (Abb.52).

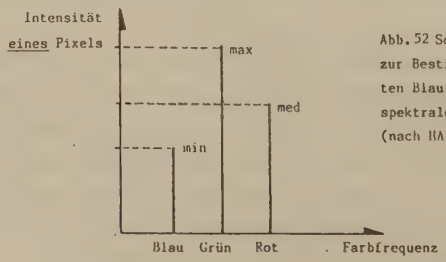


Abb. 52 Schematische Darstellung zur Bestimmung der Farbkomponenten Blau, Grün und Rot aus drei spektralen Kanälen für ein Pixel (nach HAYDN et al.,1982)

Eine Rücktransformation (IHS→RGB) ist notwendig, um die IHS-berechneten Daten wieder für die fototechnischen Prozesse abbildbar zu machen. Die von HAYDN et al.(1982/1) beschriebenen vereinfachten Beziehungen der Systeme IHS-RGB haben, auf Massendaten angewendet, den Vorteil kurze Rechenzeiten zu erlauben und trotzdem ausgezeichnete Ergebnisse zu liefern.

GILLESPIE (1980), HAYDN et al.(1982/1,2), und HAYDN (1985) belegen die Überlegenheit IHS - transformierter Farbdarstellungen in der Fernerkundung für die verbesserte Darstellung von FE - Daten. Über erste Versuche zur Verwendung von IHS - Transformationen zur Integration anderer geowissenschaftlich relevanter DS berichten GUINNESS et al.(1983) und CONRADSEN&THYRSTEDT (1985). Ihre Ergebnisse bestätigen ebenfalls eine verbesserte Interpretierbarkeit thematischer DS durch IHS - Transformationen. Abb.53 S.105 zeigt eine RGB und IHS - Verarbeitung von drei DS: digitalisiertes Luftbild, scheinbarer spez. Widerstand (EM) und Gravimetrie. Die drei DS kontrollieren R, G, B bzw. I, H, S respektive. Man beachte die Trennbarkeit der Einzelinformationen bei synoptischem Blick (IHS) und die Schwierigkeit auf einzelne Anteile der Farben Rot, Grün und Blau zu schließen (RGB).

Ein wichtiger Aspekt in der Anwendung des IHS - Systems betrifft die Festlegung der Hue - Grenzen für die Extremwerte. Es hat sich im Laufe der Arbeit mit IHS - Verarbeitungen für das Empfinden des menschlichen Auges als sinnvoll herausgestellt, thematisch wichtige Extremwerte zwischen den reinen Farben Rot und Blau aufzuspannen. Damit wird auch weitgehend üblichen Farbkodierungen bei der Darstellung von farbigen Isolinienplots entsprochen. Die Farbskala weist dann noch genügend Abstufungen auf, um auch differenzierte Eigenschaften erkennen zu lassen. So bedeuten etwa für die Farbfrequenz des IHS in Abb.53 folgende Entsprechungen: scheinbare spezifische Widerstände von mehr als 100 Ωm = blau, 100-50 Ωm = grün, 50-30 Ωm = gelborange und weniger als 30 Ωm = rot.
Die Sättigungskomponente läßt sich unabhängig von Intensität und Hue nur in wenigen Stufen unterscheiden, eignet sich also nur für DS mit wenigen thematischen Wertestufen.

vergleiche dazu Farbbilder
in der Falttasche, Nr. 11 (IHS) und 10 (RGB)

Abb.53 Darstellung der drei DS: Luftbild,EM,Gravimetrie als IHS (links) und RGB (rechts), zu Konzept und Verarbeitung sowie Interpretation siehe Kap.IV/1.4.,V/2.1.

1.3. Einschränkungen und Grenzen

1.3.1. Einschränkungen bei der Erzeugung von Rasterdaten

Bei der Überführung unregelmäßiger Flächendaten (z.B. geophysikalische Flugmessungen) in ein regelmäßiges Gitter, wie es für die Verarbeitung mit Bildverarbeitungs - Verfahren notwendig ist, sollten einige wichtige Forderungen erfüllt werden:

--- geringstmögliche Extremwertabschwächung (keine wesentliche Verringerung der Dynamik)

--- Gitterauflösung fein genug zur weitgehend unveränderten Rohdaten - Wiedergabe

--- Gitterauflösung grob genug für eine glatte Interpolation senkrecht zu Messlinien (Vermeidung von Fluglinieneffekten)

Diese sind umso leichter zu erfüllen, je eher sich die Messpunktdichte der Dimension des verwendeten Gitters nähert; bei anisotroper Datenverteilung muß ein Kompromiss zwischen verschiedenen Dichten gefunden werden. Die Digitalisierung von Isolinienkarten erfordert besondere Sorgfalt in der Auswahl der Parameter, denn hier werden bereits interpolierte Daten einer nochmaligen Interpolation unterzogen.

Die letzte Beurteilung, ob eine Manipulation von Flächendaten noch sinnvoll ist, muß von der thematischen Bedeutung und der geometrischen Zuverlässigkeit abhängen. So sind z.B. bei den gravimetrischen Daten in der Abb.53 S.105 (Sättigung im IHS) zwei Eigenschaften für eine Interpretation bedeutsam:

--- großräumige Dichtezunahme mit kleinem Δmgal (Sedimente zu Vulkaniten)

--- kleinräumiger Dichtesprung mit großem Δmgal (VK - Serien zu Kieserzen)

Werden die thematisch wichtigen Aussagen der jeweiligen Daten nach einer Rasterung und Interpolation nicht negativ verändert, so können sie als erlaubt gelten.

Bei EM, Magnetik und der Spektrometrie wurde bei der Darstellung als regelmäßig interpoliertes Raster gegenüber der Profil- und Kartendarstellung ein Informationsgewinn festgestellt. Gravimetrie und Luftbildlineamentdichte spiegeln trotz doppelter Interpolation (Punkt- und Liniendaten => interpolierte Karte => interpolierte Rasterdaten) die wichtigsten Eigenschaften für eine thematische Aussage wieder, so etwa großräumige strukturelle Trends. Als Beispiel sei die Transformation der Lineamentkarte zum Rasterbild angeführt (Abb.54).

Abb.54 Arbeitsschritte von der Lineamentkarte (links) über die Lineamentdichte (mitte) zum gerasterten Dichtebild (rechts), Ausschnitt aus dem Testgebiet, beachte die Erkennbarkeit von Strukturtrends größerer Dichten in allen drei Darstellungen

1.3.2. Einschränkungen bei der Kombination mehrerer DS

Wie unter Kap.1.2. erläutert, stehen prinzipiell drei verschiedene Verfahren zur Verfügung um die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Tab.10 gibt Aufschluss über Einschränkungen bei ihrer Anwendung.

Kombinations-methode:	"Frequenz"-Überlagerung	SST	IHS
Nachteile:	Frequenzen der DS müssen deutlich verschieden sein, keine starken Schwankungen in Amplitude und Frequenz, sensible Histogrammoperationen	Höheneffekt muß als nicht-topographische Information verstanden werden, Stereoskop nötig, aufwendigere Berechnung	geringe Intensität maskiert H und S, S ist nur m.E. als Datenträger nützlich, aufwendigere Berechnung
Vorteile:	S/W - Bild, monoskopisch, einfache Berechnung	S/W - Bild, keinerlei Maskierung der Intensität	monoskopisch, Farbfrequenz (H) ist sehr differenzierter Informationsträger

Tab.10 Eigenschaften der drei diskutierten Kombinationsmethoden

1.4. Konzept interpretationsoptimierter DS - Kombinationen für das Untersuchungsgebiet

Mit den in Tab.9,S.96a vorgeschlagenen DS und den diskutierten Darstellungensverfahren stehen fast beliebig viele Möglichkeiten zur Verfügung. Manche DS könnten jedoch nur unter Informationsverlust kombiniert werden, weil ihre Eigenschaften dies nicht zulassen. Für viele Überlagerungen gilt, daß die thematische Bedeutung der einzelnen DS keine sinnvolle Synopsis zuläßt. So macht es etwa wenig Sinn für eine explorationsgeologische Fragestellung, ein digitalisiertes Luftbild mit MSS bzw. TM - Daten oder EM und Magnetik ohne eine orientierende Grundlage zu kombinieren.

Aus dem erarbeiteten thematischen Ansatz (Kap.II/2.5.) ergeben sich für eine Übersichtsexploration zwei grundsätzliche Ziel - Schwerpunkte:

--- Erfassung der Bereiche, wo unbekannter VK ansteht oder in flacher Teufe liegt. Festlegung von Zonen im bekannten VK, dessen geologische Merkmale für eine Nähe zur Erzfazies sprechen ("Indirekte" Informationen auf Kieserze)

--- Hinweise auf Eigenschaften der Kieserze und Gesteine der engeren Erzfazies ("Direkte" Informationen auf Kieserze)

Die zu konzipierenden Kombinationen sollen also Schlüsse auf diese Phänomene gestatten. Für die Verbindung von Fernerkundungs- und geophysikalische DS lassen sich grundsätzliche Vorteile gegenüber reinen FE- und Geophysik - Kombinationen erwarten:

--- Interpretative Korrektur der Geophysik - Daten durch sichtbare Oberflächenphänomene

--- Orientierende Grundlage für Geländearbeiten

--- Verbesserte thematische Interpretationsfähigkeit durch Korrelation mit strukturell und lithologisch erkennbaren Phänomenen in FE - Daten

Geeignete interpretationsoptimierte DS - Kombinationen sollten nach drei wichtigen Kriterien zusammengestellt werden:

* DIE VERWENDETEN DS MÜSSEN THEMATISCH RELEVANTE AUSSAGEN ERWARTEN LASSEN.
* DIE KOMBINATIONSVERFAHREN MÜSSEN DS SYNOPTISCH UND TRENNBAR DARSTELLEN LASSEN.
* DS MÜSSEN IHREN EIGENSCHAFTEN NACH FÜR DAS JEWEILIGE KOMBINATIONSVERFAHREN OHNE WESENTLICHE INFORMATIONSVERLUSTE GEEIGNET SEIN

Tab.11,S.109 zeigt die Zusammenstellung thematisch interessanter DS und wichtige Eigenschaften bezüglich einer Einbeziehung in DS - Kombinationen.

Berücksichtigt man die Einschränkungen bei der Verwendung von DS und Verknüpfungsalgorithmen, so verbleiben wenige, brauchbare Kombinationsmöglichkeiten. Sieben komplexe DS - Verknüpfungen wurden ausgewählt, um sie auf eine verbesserte Interpretation gegenüber den Originaldaten zu untersuchen:

DS / Eigenschaften	TM4	TM5	TM5 Ps.plast	TM-PC1	TM-D.ratio	LB-Lin.dichte	EM	Mag	Th ϑ	K ϑ	Grav
Aussage "direkt"	-	-	-	-	+	-	+	±	-	-	+
Aussage "indirekt"	+	+	+	+	-	+	±	+	+	+	+
monofrequent	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	±
weniger als 2-3 Wertebereiche	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
Orientierungs-grundlage	+	+	+	±	- (als LB +)		-	-	-	-	-
besonders geeignet als:	I	I	A,I	I,H	S,H	A,I	H	H,P	H,P	H,P	H,S

(+ = Eigenschaft vorhanden, - = nicht vorhanden, ± = indifferent, I = Intensität, H = Farbfrequenz, S = Sättigung)
(A = Addition, P = Parallaxe)

Tab.11 Eigenschaften der DS bezüglich ihrer Kombinierbarkeit

*1 Eine additive Verknüpfung der --- Luftbild-Lineamentdichte
mit --- TM Kanal 5 Pseudoplast
läßt strukturelle Hinweise auf die konzentrische Umrahmung von vulkanischen Förderzentren und allgemein auf die differenzierte sedimentäre Fazies im VK erwarten. TM 5 läßt Strukturen verstärkt hervortreten, die in einer Größenordnung von mehreren 100 m bis km liegen. In der Lineamentauswertung des Luftbilds werden dagegen auch kleinere Phänomene erfasst, so ergänzen sich beide Informationen. Abweichendes Strukturverhalten könnte sich unter flacher TG - Bedeckung durchpausen und so eine im Gelände nicht kartierbare, potentiell interessante VK - Fortsetzung indizieren. TM 5 Pseudoplast bietet zusätzlich die Möglichkeit, sich mit beiden DS im Gelände zu orientieren. Die additive Behandlung beider DS bietet sich aus den Dateneigenschaften heraus an. (Vgl.Kap.III/2.1.2.,2.1.3. und IV/1.2.2.)

*2 Ein synthetisches Stereobild mit --- TM 4 als Intensität
und --- Magnetik als Parallaxe
könnte sowohl "direkte" Informationen auf magnetische Erzfazies als auch auf magnetisch abweichende Körper im VK (Vulkanite mit höherem Magnetit und Magnetkiesgehalt) abbilden. Möglicherweise ist die etwas höhere Magnetisierung

der VK - Serien zu TG und TQ als Trend mit den im TM 4 sichtbaren lithologischen und strukturellen Hinweisen parallelisierbar. TM 4 dient hier als DS, um die Magnetik direkt mit lithologischen Oberflächenphänomenen zu korrelieren und eine aktuelle orientierende Grundlage zu erhalten. Die Parallaxendarstellung dürfte sich gut zur Unterscheidung magnetischer Anomalien mit verschiedenen Gradienten eignen. (Vgl.Kap.III/2.1.2.,2.2.1.2. und IV/1.2.1.)

*3 Eine IHS - Darstellung von --- TM 5 als Intensität
--- TM PC 1 als Farbfrequenz
und --- TM Doppelratio als Sättigung
bieten das hohe Auflösungsvermögen des TM in allen DS, lithologische und strukturelle Informationen über TQ,VK,TG zusammen mit Oberfächenphänomenen als TM 5 und PC 1. Das Doppelratio soll stark oxidische, Fe-haltige Bereiche verstärken und Rückschlüsse auch auf kleinflächige bergbauliche Aktivitäten, sowie höhere Konzentrationen von Gossan - Mineralen ermöglichen. Die IHS - Darstellung bewährte sich bereits als Möglichkeit, verschiedenartige Fernerkundungs - DS mit ihren differenzierenden Eigenschaften als subtile farbliche Information einer Interpretation zugänglich zu machen.(Vgl.Kap.III/2.1.2. und IV/1.2.3.)

*4 Die IHS - Kombination von --- TM 5 Pseudoplast als Intensität
--- TM Doppelratio als Farbfrequenz
und --- TM Doppelratio als Sättigung
liefert auf einer strukturverstärkenden und orientierenden Grundlage (TM 5 Pseudoplast) simultan durch Farbfrequenz und Sättigung verdeutlicht, spezifische Informationen über oxidische Fe - Minerale im Testgebiet. Diese Verarbeitung soll als Alternative zu *3 gesehen werden, beschränkt auf strukturelle und limonitische Informationen. Die Bedeutung der Doppelratio - Information kann besonders wirkungsvoll durch die simultane Kontrolle von Farbfrequenz und Sättigung unterstrichen werden, so daß ein IHS die geeignete Darstellungsform ist. (Vgl.Kap.III/2.1.2. und IV/1.2.3.)

*5 Darstellung als IHS/SST mit --- TM 4 als Intensität
--- Th-Spektrometrie als Hue

--- Sättigung konstant
und --- K-Spektrometrie als Parallaxe

Sie soll Aufschluß über lithologisch wichtige Differenzierungen im VK und mögliches Auftreten von Vulkaniten in Fenstern des TG geben. Ausserdem wird eine bessere Synopsis der Informationen über Th- und K - Gehalte in der Nähe bekannter Erzfazies erwartet. TM 4 bietet Korrektiv, Orientierung und eingeschränkt auch lithologische und strukturelle Unterscheidungen. Die differenzierten Eigenschaften der spektrometrischen Daten werden am Besten durch die Hue- und Parallaxenkomponente unabhängig wiedergegeben.
(Vgl.Kap.III/2.1.2.,2.2.1.3. und IV/1.2.1.,1.2.3.)

*6 Eine weitere komplexe Darstellung
IHS/SST mit --- TM 4 als Intensität
--- EM als Farbfrequenz
--- Sättigung konstant
und --- Magnetik als Parallaxe

könnte direkte Aussagen über Erze und Erzfazies zulassen, auch wäre eine verbesserte Synopsis von lithologischen Trends mit geringem Widerstand und höherer Magnetisierung wahrscheinlich. TM 4 soll hier neben der orientierenden Unterlage vor allem als Korrektiv der EM - Daten wirken. Beide geophysikalischen Informationen lassen Aussagen auf Verhältnisse in größerer Teufe (10er-100 m) zu, und empfehlen sich als zu kombinierende DS. Auch hier wird von einer Darstellung als Hue- und Parallaxenkomponente die für eine Interpretation günstigsten Ergebnisse erwartet.
(Vgl.Kap.III/2.1.2.,2.2.1.1.,2.2.1.2. und IV/1.2.1,1.2.3.)

*7 Die IHS - Kombination von --- digitalisiertem Luftbild als Intensität
--- EM als Farbfrequenz
und --- Gravimetrie als Sättigung

läßt durch die Eigenschaften der EM- und Gravimetrie - Daten direkte Hinweise auf Erzkörper erwarten, auch in größere Teufen. Problematisch sind die oberflächlichen Störeinflüsse auf das EM - Signal. Hier soll die Gravimetrie und das Luftbild als Korrektiv wirken, das Luftbild gleichzeitig als orientierende Grundlage. Bei den gravimetrischen Daten als

Sättigungskomponente dargestellt scheinen nur drei "Informationsniveaus" thematisch interessant. Die IHS - Darstellung scheint hier die geeignetste Form zu sein. (Vgl.Kap.III/2.1.3.,2.2.1.1.,2.2.2.1. und IV/1.2.3.)

Es sind durchaus noch weitere Kombinationen der vorliegenden DS denkbar. Allerdings repräsentieren *1-7 von der thematischen und methodischen Zusammenstellung her eine Auswahl, die die Struktur der DS und möglicher Verknüpfungsmethoden optimal berücksichtigt.

Die kombinierte Darstellung von mehr als drei unabhängigen DS in einer Darstellung wurde nicht näher betrachtet. Es ist bereits als nicht unproblematisch anzusehen, drei DS mit den diskutierten Verfahren zu verknüpfen und sich bei einer Interpretation die Bedeutung einzelner Kombinationselemente bewusst zu sein (vgl.-Kap.IV/1.2.1 und 1.2.3.). Vier oder mehr unabhängige DS überfordern hier mit Sicherheit die Fähigkeit des Interpreten zur Entkoppelung der Informationen. Statistische Verfahren und Korrelationsanalysen würden zwar die Einbeziehung beliebig vieler Informationsebenen erlauben, aber den für eine detaillierte Interpretation nötigen Rückschluss auf die Quellendaten verhindern.

Über Erfahrungen einer Interpretationsverbesserung am konkreten Testobjekt hinaus werden auch Kriterien zur Beurteilung konzeptioneller Standards in der DS - Kombination für andere DS und Fragestellungen erwartet.

2. Verarbeitung von DS mit Methoden eines Geographischen Informations Systems (GIS) und der digitalen Bildverarbeitung (BV)

In diesem Kapitel werden die Methoden und Softwaresysteme kurz vorgestellt, die

--- zur Untersuchung des Informationsgehaltes einzelner DS (Kapitel III)

--- zur thematischen Aufbereitung der DS

--- und zur Herstellung von DS - Kombinationen

verwendet wurden. Anstatt die z.T. umfangreichen Programme, die in den Sprachen BASIC, FORTRAN und FORTH realisiert sind, als Listings aufzuführen, sollen im Kleindruck kurze Funktionsbeschreibungen folgen. Listings in BASIC und FORTH für die BV -

Software SWING und die Registrationsprogramme liegen am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie auf. Für das GIS steht von der Firma ESRI Inc. eine Dokumentation zur Verfügung. Abb.55 S.115. skizziert die für die Herstellung von DS - Kombinationen erforderlichen Software - Systeme an Hand eines Ablaufplanes.
Eine Grundforderung für alle Untersuchungen war die Möglichkeit, beliebige Daten in Kartenform in digitales, gerastertes und interpoliertes Format überführen zu können. Damit sollten solche Daten mit bereits in Rasterform vorliegenden Fernerkundungs- und geophysikalischen DS über BV - Algorithmen verarbeitbar und verknüpfbar gemacht werden.

2.1. Vorbereitung von Kartendaten

Drei DS lagen lediglich in Kartenform vor, z.T. als großmasstäbliche Blätter. Es waren dies die Gravimetrischen Daten (1:5000), die Karten des scheinbaren spezifischen Widerstandes (1:12500) und die Lineamentdichte (1:50000). Die beiden Ersteren mußten auf kleinere Masstäbe gebracht werden, um die nachfolgende Digitalisierung zu ermöglichen. Dazu wurden beide Kartenwerke von jeweils 7 Teilblättern mittels Großkopieranlagen auf einen Masstab gebracht, der die Karteninformation auf eine Fläche von max. 100x80 cm reduzierte. Auf Folie konnten dann alle Isolinien, Maxima und Minima, sowie etwa 10 Passpunktmarkierungen pro Gesamtkarte herausgezeichnet werden.

2.2. Umwandlung in digitale Rasterdaten

Das Digitalisierungsmodul DIMAIN der Firma FELDLE und eine Version von 1982 der Softwarepakete GRID, TOPO und PIOS der Firma ESRI standen als komplettes Geographisches Informations System (GIS) für die Untersuchungen zur Verfügung. Die eigentliche Aufgabe eines GIS, das Management und die Dateihaltung verschiedener erdwissenschaftlicher DS zu unterstützen, wurde hier nicht verfolgt. Ziel war es ja, interpretationsoptimierte DS - Kombinationen von verschiedenen DS mit Methoden der digitalen BV zu erhalten, diese bietet ein flexibleres Instrumentarium bei der Behandlung von Rasterdaten. So wurden nur die Elemente eines GIS benutzt, die zur Erfassung und Herstellung digitaler DS nötig sind, um dann mit BV - Methoden weiterzuarbeiten.
Die umgezeichneten Isolinien werden mit Hilfe eines Digitalisietisches und dem Modul DIMAIN in Polygonzüge umgewandelt. Nach der Zuordnung der Werte für Maxima, Minima und Isolinien können Korrekturen einzelner Geometrien und zugeordneter Werte vorgenommen werden. Schließlich werden die Daten in eine Form überführt, die sie für die folgenden GIS - Operationen annehmbar macht. Für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte genügen Programme des Paketes GRID:
CONCON filtert informationsfreie Punkte der digitalen Polygonzüge mit wählbarer Toleranz heraus und reduziert dadurch die Datenmenge erheblich. CONGRD verwandelt die Vektordateien in eine regelmäßiges Gitter mit wählbarer Zellengröße. Zellen zwischen benachbarten Punkten gleichen Wertes werden ebenfalls mit diesem Wert belegt. Anschließend findet eine zeilen- und spaltenweise, bilineare Interpolation zwischen besetzten Zellen statt. Die Ausgabefiles werden mit einem Umsetzprogramm auf ein mit der BV - Software lesbares Format gebracht (Dokumentation zu DIMAIN, Fa. FELDLE (1984) und GRID Fa. ESRI (1982).
Als Rasterdimension (Zellengröße) und Messwertetransformation in den der BV - Software zur Verfügung stehenden Zahlenraum (0-255) wurde für die drei DS gewählt:

	Rastergröße	Messwertetransformation
Gravimetrie	25 m	78-92 mgal ---> 0-255
EM	100 m	0-180 Ωm ---> 255-0
Lin-dichte	100 m	0-16 LpR ---> 0-255

Für die DS Magnetik und Gamma - Spektrometrie standen digitale Flugliniendaten des BGR zur Verfügung. Diese irregulären Massendaten (Flugwegdaten) konnten dankenswerterweise bei der Abteilung Geophysik des BGR in Rasterdaten umgesetzt werden. Dies geschah mit Programmen des Softwarepakets GEOPAK der Fa. International Software Contractors A.B. Die Flugdaten wurden in den zwischenliegenden Gitterpunkten quadratisch interpoliert, um die Differenz der Messpunktsabstände auf den Fluglinien und senkrecht dazu auszugleichen. Leider waren die EM - Daten nicht in geeigneter digitaler Form verfügbar und so mußte auf vorhandene Karten zurückgegriffen und diese nach Kap.2.1 und 2.2 aufbereitet werden. Die interpolierten BGR - Daten wurden als Messwerte (cps,nT) in den Zahlenraum 0-255 transformiert, wobei die spektrometrischen Daten als Messwerte direkt dimensionslos übernommen werden konnten. Die Magnetikwerte erhielten eine additive Konstante (+82 nT), um das absolute Minimum auf 0 anzuheben. Eine lineare Histogrammaufspreizung bzw. -kompression auf die Dynamik 0-255 machte die Daten für die BV lesbar. Durch eine einfache Koordinatentransformation mußte noch der Gitterursprung verlegt werden. (Dokumentation zu GEOPAK: Manual ISC A.B. 1982)

2.3. Luftbildigitalisierung

Das Repronegativ (1:1) eines Luftbildes des engeren Abbaugebietes um Tharsis konnte am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover mit Hilfe eines Lese - Scanners bei 100 µm (entspricht 2 m im Gelände) Rastergröße digitalisiert werden. Die Luftbilddaten konnten in dieser Form ohne wesentliche Informationsverluste in eine Kombination mit anderen DS als orientierende Grundlage einbezogen werden.

2.4. Verarbeitung der digitalen Rasterdaten mit BV

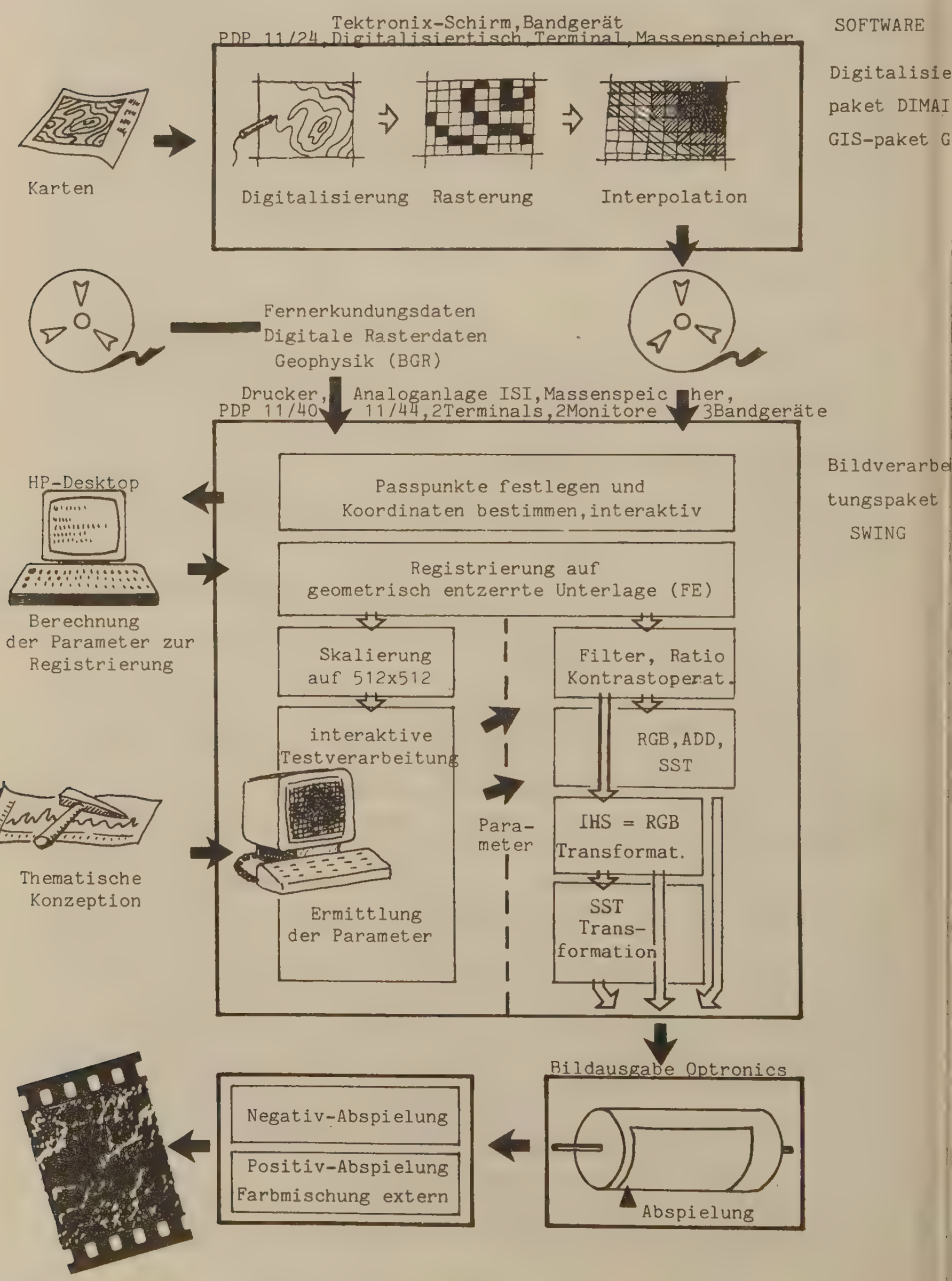
Das am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München entwickelte Softwarepaket "SWING" erlaubt digitale Verarbeitungen an Rasterdaten. SWING arbeitet unter FORTH, einer hochmodularen, interpretativen Programmiersprache.
Die wichtigsten verfügbaren BV - Verfahren (Stand Mitte 1985) sind:

--- Eingabe, Ausgabe verschiedener Datenformate auf Magnetband
--- Arithmetische und logische Bilddaten - Operationen
--- Statistische Auswertung und Manipulation von Bilddaten
--- Hauptachsentransformationen
--- Klassifizierung ("supervised")
--- Interaktive Cursormessungen
--- Verschiedene Filteroperationen
--- Geometrische Korrektur verschiedener DS ("Registrierung")
--- RGB-IHS, SST Transformationen
--- Ausgabeprozeduren für Farbmonitore, Drucker und Filmschreiber

Für eine detailliertere Beschreibung der Module und Programme sei auf ZGF (1978) und das am Institut aufliegende aktuelle Programm - Handbuch verwiesen.

Eine schematische Darstellung der bei DS - Verarbeitungen und -Kombinationen nötigen Arbeitsabläufe und benötigten Module zeigt Abb.55,S.11 .
Die DS werden zuerst auf Massenspeicher eingelesen. Bei allen konzipierten Kombinationen aus verschiedenen DS ist die orientierende Grundlage entweder ein nicht entzerrtes Luftbild oder es sind geometrisch korrigierte TM - Daten. Zur Orientierung im Gelände reicht nach meiner Erfahrung die Abbildungsgenauigkeit speziell für eine Übersichtsexploration bei weitem aus, da topographische Marken oder erkennbare anthropogene Merkmale eine ausreichende Orientierungsdichte bieten. Orthophotos oder geometrische Feinkorrekturen erscheinen in ihrem zusätzlichen Aufwand nicht gerechtfertigt. Auf diese Grundlage nun mußten alle anderen DS korrigiert werden. Für Zwecke einer Übersichtsexploration schien z.B. eine Genauigkeit von ±50 m die Toleranzgrenze für Passfehler der geophysikalischen DS zu sein, sie orientiert sich an der Rastergröße und durchschnittlichen Messdatendichte. Passpunkte, möglichst homogen über die Fläche des DS verstreut, lieferten die Berechnungsparameter. Extern wurde an einem Kleinrechner eine bilineare Registrierung der zu korrigierenden DS auf die orientierende Grundlage vorgenommen (HENKEL,1982). Testanpassungen wurden durchgeführt, bis die Passgenauigkeit für jeden Passpunkt kleiner als 1 Pixel (Rasterzelle) des zu korrigierenden DS ist. Dann erfolgt in SWING die gewünschte Korrektur.

Abb. 55 DIE AUFBEREITUNG UND VERARBEITUNG DER DATENSÄTZE



Da die weitergehende Arbeit Parameter für die arithmetischen und logischen Operationen verlangt und die registrierten DS Datenvolumina von bis zu 2 mio byte aufweisen, empfiehlt sich eine Testverarbeitung mit reduziertem Datenvolumen. Die Farbmonitore stellen Bilder bis maximal 512x512 Pixel dar, eine sofortige bildhafte Kontrolle der erzeugten Verarbeitungen erforderte also eine Beschränkung auf diese Größe.
Die Daten wurden somit auf dieses Volumen statistisch repräsentativ reduziert. Die Programmschritte für Testverarbeitungen als auch die endgültige Berechnung der DS - Kombinationen sind prinzipiell gleich. Testverarbeitungen, die nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen, wurden mit veränderten Parametern neu durchgeführt. Ermittelte Werte für die vorgeschlagenen Produkte sind im Anhang 7 aufgeführt. Die digitalisierten EM - Daten mußten auf Grund ungünstiger Isolinienabstufung in der Karte noch geglättet werden, durch die Überführung einer logarithmischen Wertestufung in eine lineare traten für hohe scheinbare spezifische Widerstände Plateaueffekte auf, die sich bei einer Interpretation störend auswirken könnten. Dies wurde durch eine Skalierung mit dem Faktor 3 und einem anschließenden Bewegten-Mittelwert-Filter erreicht. So konnten Extremwerte beibehalten, die Kanten der Plateaus aber geglättet werden.
Die DS werden nun spezifisch weiterverarbeitet:

--- Hauptachsentransformationen
--- Arithmetische Operationen (Addition,Ratio u.a.)
--- Filter (bewegter Mittelwert,Highpass u.a.)
--- Pseudoplastverarbeitungen
--- Kontrastoperationen (Histogramm-Manipulationen)
Dabei wird die Statistik der DS - Grauwerte so verändert, daß das entstehende Bild für den Interpreten eine optimale Differenzierbarkeit zeigt. Auch für Farb- und SST - Darstellungen sind Histogrammanpassungen nötig, um gewünschte Farbfrequenzen, Sättigung und Parallaxendynamik zu erhalten. Für eine detaillierte Beschreibung der Möglichkeiten und Wirkungen von Manipulationen an der Bildstatistik wird verwiesen auf SIEGAL& GILLESPIE (1980), SABINS (1978) und CURRAN (1985).

DS - Kombinationen, die als schwarz/weiss Bilder konzipiert waren, wurden mit "ADD" (Addition nieder- und hochfrequenter DS) oder "SYNSTEREO" (synthetische Parallaxenbilder) berechnet. RGB - Farbbilder werden als kontrastoptimierte DS direkt auf Fotomaterial abgespielt, um dann erst im Farblabor bei der Farbmischung kombiniert zu werden.
IHS - Produkte erfordern ein etwas aufwendigeres Verfahren. Die vorbereiteten DS werden als Intensitäts-, Farbfrequenz- und Sättigungsinformation in ein RGB - System überführt ("RED", "GREEN","BLUE"). Eine zusätzliche Einbeziehung eines SST - Effektes in ein IHS - Bild erfordert die Berechnung aller drei RGB - Auszüge über "SYNSTEREO" zu jeweils drei stereoskopischen Farbauszügen.

2.5. Abspielung und Photoprodukt

Die Bildausgabe erfolgt mittels eines Fotoscanners. Schwarz/weisse Bildprodukte werden als Negativ und Farbbilder als Positivdarstellung von Rot/Grün/Blau - Farbauszügen auf panchromatisches Filmmaterial abgespielt. Bei Letzteren findet im Farblabor eine additive Farbmischung statt, um ein colortechnisch reproduzierbares Diapositiv - Transparent zu erhalten. Als interpretationsfähige Vorlagen dienen schließlich davon hergestellte Farbbilder auf CIBA-CHROME Hochglanzmaterial.

2.6. Möglichkeiten und Grenzen

Die Untersuchungen zum Informationsgehalt der DS und die konzipierten DS - Kombinationen konnten mit der zur Verfügung stehenden Hard- und Software ohne wesentliche Einschränkung durchgeführt werden. SWING erwies sich als geeignet geophysikalische Rasterdaten ohne Einschränkungen zu verarbeiten, entscheidend ist eine Aufbereitung solcher Massendaten (Ursprungsabgleich, Messwertetransformation auf eine Dynamik von 8 Bit) und letztlich ein sinnvolles Verarbeitungskonzept.
Der Aufwand an Rechenzeit für die Erzeugung von DS - Kombinationen der hier durchgeführten Art ist z.T. beträchtlich. Die Teilprozeduren mit den längsten Verarbeitungszeiten sind die Digitalisierung und Interpolation von Kartendaten und die Berechnung komplexer DS - Kombinationen.

3. Technische Qualität der erzeugten DS - Kombinationen

Alle sieben konzipierten und erzeugten DS - Kombinationen werden im Anhang 8 nach technischen Kriterien diskutiert. Die Basis dafür sind die konzeptionellen Erwartungen und die realen, mit der zur Verfügung stehenden Hard- und Software erreichten Resultate. Hier werden also keine explorationsgeologischen Interpretationen und Einschätzungen vorgenommen, diese folgen im nächsten Kapitel V., Ergebnisse. Die berechneten und auf Photomaterial abgespielten Kombinationen finden sich am Ende dieser Arbeit in einer Falttasche. Alle für die Berechnung nötigen Bildverarbeitungsparameter der sieben Kombinationen finden sich im Anhang 7.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sowohl die Verwirklichung der Kombinationskonzeptionen als auch die technische Qualität der fertiggestellten DS - Kombinationen den Erwartungen gerecht wurde und eine gute Basis für die thematische Interpretation darstellt.

V. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN

1. Ergebnisse aus den geologischen Daten

Für die Übersichtsexploration lassen sich Selektionskriterien für lithologiscne und strukturelle Phänomene bestimmen, wie sie bereits unter II/ 3.5. kategorisiert wurden. Auf der Basis der vorliegenden geologischen Karte (Abb.5,S.18b) sollen auf Grund genetischer Überlegungen für fünf kartierte Nebengesteins - Assoziationen Prioritätszonen festgelegt werden, die mit bekannten Kiesvererzungen hoch korrelieren und damit einen Nachweis ihrer Zuverlässigkeit auch für potentielle neue Vorkommen erbringen. Bei kleinräumigen geologischen Detailaufnahmen können zusätzlich weitere, für oberflächennahe Kiesvererzungen signifikante und kartierbare Indizien erfasst werden. Diese unter II/3.5. ebenfalls bereits erwähnten, potentiellen Anzeiger sollen an fünf Detail - Kartiergebieten mit bekannten Vorkommen ebenfalls auf ihren Aussagewert hin getestet werden.

1.1. Übersichtsexploration

Als sinnvoll erschien mir die Definition von Prioritätszonen jeweils um Einheiten, lithologische Grenzen und spezielle Eigenschaften kartierter Einheiten. Dabei mußte der bevorzugt lateralen Orientierung aller Serien mit unterschiedlichem Abstand der Zonen senkrecht und parallel zum Streichen Rechnung getragen werden. Die Abstandswerte ergaben sich dabei aus den geologischen Eigenschaften der Serien und ihrer Affinität zu bekannten Erzvorkommen. Im Anschluss an kartierte VK-Serien kann durch die tektonische Situation (Antiklinorien,Antiklinalstrukturen) davon ausgegangen werden, daß weiterer höffiger VK in geringer Teufe ansteht. Massige rhyolitische, dazitische und andesitische Vulkanitkörper markieren häufig die Nähe zu bekannten Erzvorkommen. Dasselbe gilt für geringmächtige und stratiforme Spilite. Manganschiefer halten lateral weiter aus und sind als genetische Anzeiger für potentielle Erzfazies wertvoll. Lithologisch stark wechselnde, kleinräumige VK-Serien schließlich markieren ebenfalls häufig die Nähe zu produktiver Kieserzfazies.(vgl. Tab.12,S. 119 vgl. auch Kap.II/2.5.).

Serien / Zonen Abstand	bekannte VK-Ausdehn.	meta-Rhyol., Daz., Andes. +Tuffe	stratiforme meta-Basalte (Spilite)	Mn-Schiefer	litholog. stark wechs. VK
‖Streichen	3 km	2 km	2 km	3 km	1 km
⊥Streichen	1 km	1 km	0,5 km	0,5 km	0,5 km

Tab.12 Festlegung der Zonen - Abstandswerte nach geologischen und erzgenetischen Kriterien

Jeder der zutreffenden Eigenschaften wird der Prioritätswert 1 zugeordnet und bei Überschneidungen additiv behandelt. So ergibt sich aus der geologischen Karte ein Prioritätsmuster mit Häufungszonen bis Prioritätsstufe 4 (Abb.56,S.119a). Vergleicht man die so erstellte Karte mit bekannten Schürfen (auf Grund oberflächennaher Mineralisationen), kleineren und größeren Kieslagern (5 mio t Grenzwert) wird bereits eine hohe Korrelation deutlich. Die Matrix zwischen Prioritätsklasse und der bergbaulichen Bedeutung zeigt dies noch differenzierter (Tab.13).

Prioritätsklasse / bergbaul. Bedeutung	0	1	2	3	4
Mineralisationen Schürfe	2	0	5	6	2
kl. Erzvorkommen (<5 mio t)	0	1	10	8	8
gr. inaktive Erzlager* (>5 mio t)	0	0	4	4	3
gr. aktive Erzlager* (>5 mio t)	0	0	0	1	1

Tab.13 Erzfazies und ihre Lage in Prioritätsklassen des Testgebiets (Kieserze)
*=ursprünglicher Erzinhalt, nach IGME (1982) und PINEDO VARA (1963)

Für potentiell interessante Kiesvorkommen (ungeachtet ihres spezifischen Erzinhalts) gilt also, daß diese im Testgebiet auf die Prioritätszonen 2,3,4, für große, heute noch aktive auf 3 und 4 beschränkt sind. Eine solche Vorgehensweise eignet sich durch ihre geringe räumliche Genauigkeit allerdings nur für eine Bearbeitung im regionalen Masstab (bis etwa 1:50000).

Abb.56 Prioritätszonen auf Grund von Nebengesteinsassoziationen der Erzfazies, mit Lage bekannter Vererzungen

1.2. Beurteilung von Detailgebieten nach feldgeologischen Kriterien

Inwieweit kann aus feldgeologischen Beobachtungen an Gesteinen der Geländeoberfläche auf in der Teufe liegende Kieserze geschlossen werden? Diese Frage umreisst den Ansatz, mit dem fünf kleinere Teilgebiete aus dem Testgebiet im Masstab 1:5000 aufgenommen wurden. Die Lage der Testflächen kann Abb.56,S.119a entnommen werden. Es wurden Flächen ausgewählt die

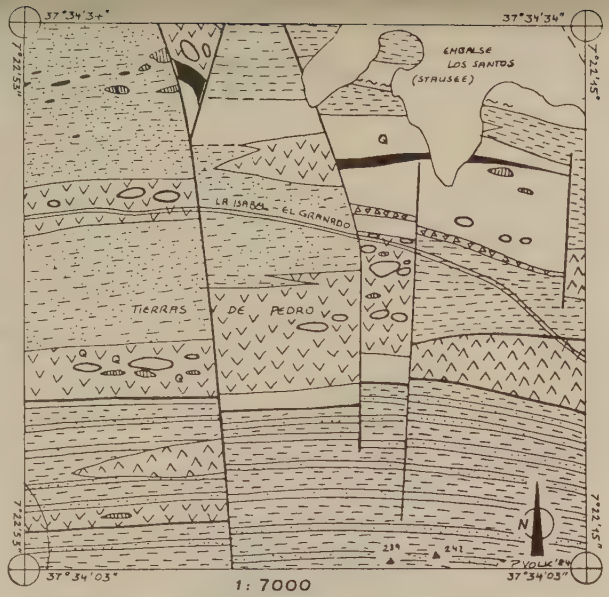
--- diffuse Vererzungsspuren (Tierras de Pedro)
--- anstehende Massiverze (Almagrera, Romanera)
--- Erzkörper in flacher Teufe (Cantareras, Rica)
--- Erzkörper in größerer Teufe (Nueva Almagrera)

und gleichzeitig ein Maximum an zugänglichen Informationen über Ausdehnung und Lage der Vererzungen aufweisen.
Kartiert wurden die Serien nach megaskopischen Gesichtspunkten auf der Grundlage oft kleinmasstäblicher, vorliegender Karten (IGME, Ca.Tharsis S.A., SALPETEUR 1976) und Luftbilder (s.Kap. II/2.3.). Besonderer Wert wurde auf die Erfassung von kleinräumig auftretenden

--- Schwarzschiefer - Vorkommen
--- gebleichte Tonschiefer und Tuffe
--- Jaspislinsen und Manganschiefer
--- Minerale der Verwitterungszone (gossan)
--- starken Verquarzungen

gelegt, um so ein im Gelände einfach handzuhabendes Instrumentarium anwenden zu können. Die Abb.57-61 (S.120a-c) zeigen die Ergebnisse der Kartierarbeiten, zum Vergleich sind, soweit vorhanden, die Lage der Oberkante bekannter Erzkörper eingetragen.

Generell ist die streng stratiforme Orientierung aller Serien hervorzuheben, wobei selbst meta-rhyolitische Vulkanitstöcke und subvulkanische Intrusionen sich dem Generalstreichen anpassen. Für die bekannten Kiesvorkommen und ihre Lage gilt, je näher der Oberfläche, desto eindeutiger lässt sich mit obigen Kriterien die Lage der Oberkante eines vorhandenen Erzkörpers festlegen. Im Falle von Nueva Almagrera fehlt allerdings jegliches Anzeichen. Hier wurden als Tiefe der Oberkante 40 m ermittelt (SENGPIEL 1983), alle anderen Vorkommen streichen in geringeren Teufen bzw. an der Oberfläche aus.



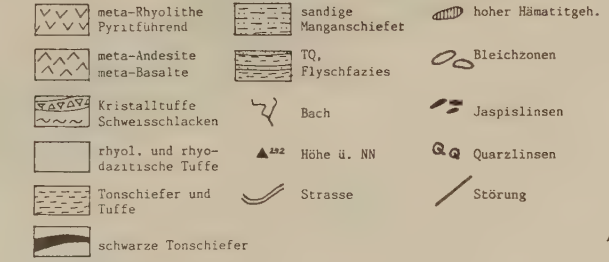
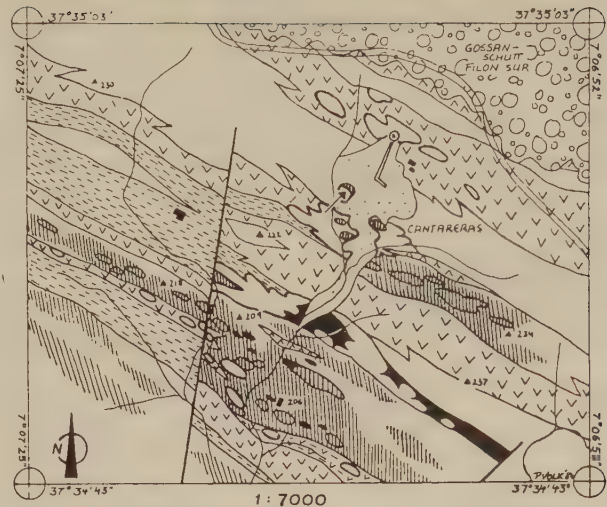


Abb. 57 Geologische Karte Tierras de Pedro, E San Isabel



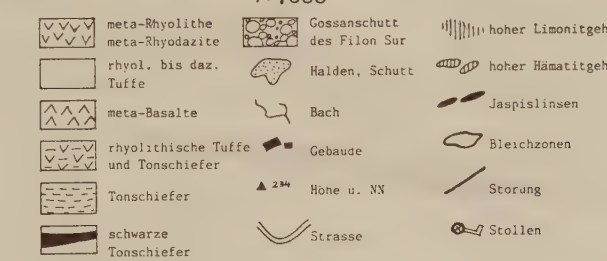
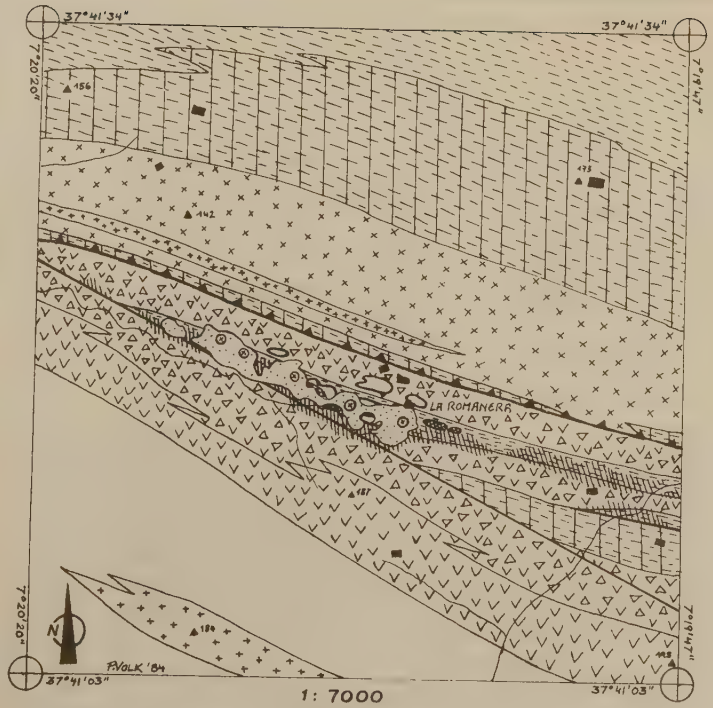
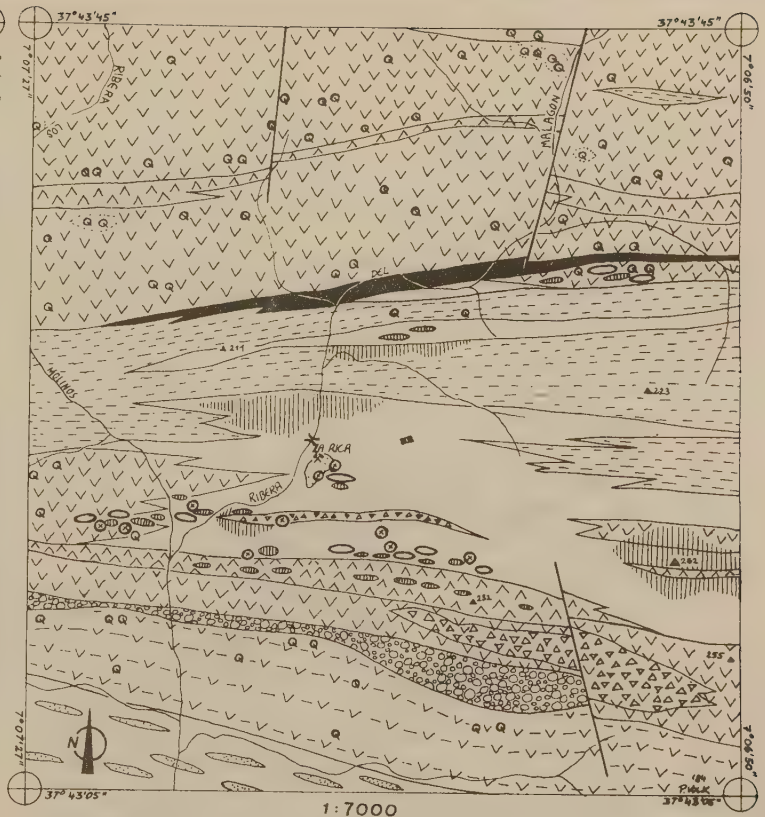


Abb. 58 Geologische Karte von Cantareras, S Tharsis



1: 7000

- rhyodazitischer Subvulanit
- "mikro-Granit" SALPETEUR 1976
- meta-Rhyolithe Laven + Tuffe
- daz., brekziierte Laven + Tuffe
- meta-Dazite meta-Andesite
- TG, kontaktmetamorph Hornfelse
- TG, Tonschiefer
- Halden, Schutt
- Bach
- Gebäude
- ▲187 Höhe ü. NN
- hohe Limonitgeh.
- Hämatitvorkommen u. andere Cosammerate
- Bleichzonen
- Jaspislinsen
- Aufschiebung
- Schacht, Schurf

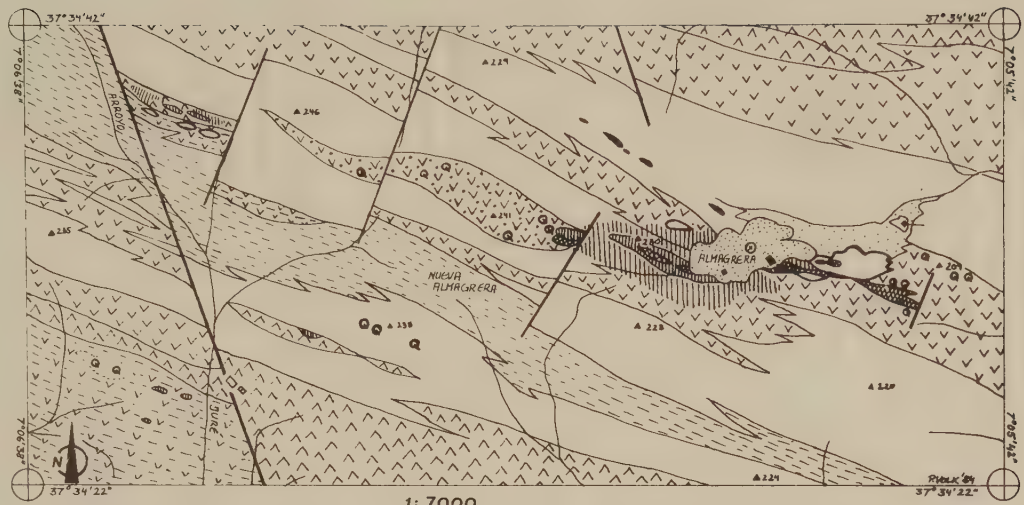


1:7000

- meta Rhyolithe meta-Rhyodazite
- meta-Andesite
- rhyodazitische Pyroklastika
- meta Tuffe
- rhyodazitische Tuffe + Tonsch.
- Tonschiefer
- schwarze Tonschiefer
- TG, Transgressionsserie
- Halden
- Bach
- Gebäude
- ▲252 Höhe ü. NN
- Schacht, Schurf
- hohe Limonitgeh.
- Hämatitgeh.
- Bleichzonen
- Quarzlinsen
- Störung

Abb. 59

(1976)



rhyodazitische Laven
massive Rhyolithe
meta-Basalte
Tonschiefer und Tuffe
rhyodazitische Tuffe
Tonschiefer
Halden, Schutt
Bach
Gebäude
Höhe ü. NN
hohe Limonitgeh.
hoher Hämatitgeh.
andere Gossan-minerale
Bleichzonen
Jaspislinsen
Quarzlinsen
Störung
Schacht

Abb. 61 Geologische Karte Nueva Almagrera und Almagrera, Oberkante der Erzkörper nach SENGPIEL (1983)

Bleichzonen geben nach meiner Erfahrung die zuverlässigsten Anzeichen für Kiesvererzungen, entstehen sie ja weitgehend in situ und unmittelbar am Kontakt Erz/Nebengestein (vgl.Abb.28,S. 49). Dies lässt sich an allen fünf Beispielen auch überzeugend demonstrieren. Alle Gossantypischen Minerale, besonders erhöhte Limonitgehalte zeigen hingegen eine Tendenz zu größerer räumlicher Streuung.
Die differenzierte Kartierung auf Merkmale der Kieserzfazies hat allerdings zwei bedeutende, prinzipielle Einschränkungen im Testgebiet. Erstens verhindern häufig anthropogene Umlagerungen (Halden, alte Schmelzen, Transportverluste usw.) eine ungestörte Aufnahme, extrem ist dies am Beispiel der großen Vorkommen um Tharsis zu sehen (vgl.Abb.40 S.77). Zweitens sind alle Vorkommen nicht nachweisbar, die der Verwitterung und oxidierenden Bedingungen nicht mehr zugänglich sind, d.h. in größerer Teufe liegen (z.B. Nueva Almagrera).

2. Ergebnisse aus der Bearbeitung der DS - Kombinationen

Hier bietet sich gegenüber den geologischen Daten die Möglichkeit homogen flächendeckend Hinweise sowohl auf lithologische Einheiten und Strukturen, als auch auf geophysikalische und spektrale Anomalien, die durch Erzkörper und Erzfazies verursacht sein können, zu erhalten. Es können abhängig von den Eigenschaften des Messystems auch in größerer Teufe liegende anomale Körper erfasst werden. Um den Informationsgehalt der vorliegenden DS einschätzen zu können, wurde bereits eine thematische Beurteilung durchgeführt (Kap.III). Deren Befunde sollen nun mit denen einer Auswertung von sieben erzeugten DS - Kombinationen verglichen werden. So sollen Vor- und Nachteile einer Auswertung der DS für sich und als interpretationsoptimierte DS - Kombinationen transparent gemacht werden und eine Beurteilung der Methode erlauben. Spezielles Augenmerk wird dabei auf bekannte Vorkommen gerichtet, um über zuverlässige Referenzen zu verfügen. Abschließend werden die Ergebnisse der Auswertungen unter zwei für Explorationsfragestellungen wichtigen Gesichtpunkten zusammengefasst, diskutiert und mit geologischen Beobachtungen verglichen.

2.1. Auswertung

Hier sei nochmals kurz rekapituliert, welche Aussagen mit DS und ihren Kombinationen erwartet werden:

--- strukturelle (lithologisch abwechslungsreiche Nebengesteinsserien, VK-Tiefeninformation)

--- lithologische (Art der Vulkanite im VK, Gossanminerale, VK-Tiefeninformation)

--- Lokalisierung von Anomalien, die in direktem Zusammenhang mit Vererzungen gesehen werden können (Dichte, Widerstand, m.E. Magnetisierung)

Interpretierbare Eigenschaften, direkte oder indirekte Hinweise auf potentielle kleinräumige Explorationsgebiete und deren Lage werden für die sieben DS - Kombinationen erörtert. Dies geschieht auf der Grundlage von Musterinterpretationen, die im gleichen Masstab wie die beiliegenden Bildprodukte (Faittasche) teilweise unter dem Stereoskop angefertigt wurden.
Um eine unbewusste Einbeziehung bereits an Quellendaten erkannter Zusammenhänge weitgehend auszuschliessen, hielt ich mich streng an genau definierte Kriterien (s. jeweils die Legende der Interpretationen). Diskutierte Bereiche werden über Gitternetzkoordinaten angegeben. Vergleiche mit den vorliegenden Quellendaten sollen in einem zweiten Teil die Kriterien zur Einschätzung von Vor- und Nachteilen liefern.

1 KOMBINATION DER STRUKTURINFORMATION VON TM5 MIT DER LUFTBILD-LINEAMENTDICHTE (TM5PLAST+LINDICHTE)

Mit dieser Kombination werden Informationen über die Verteilung ss/sf - paralleler Strukturen im Testgebiet dargestellt. Da die Umgebung der Erzfazies sich durch eine abwechslungsreichere Lithologie und häufige bc-Strukturen auszeichnet, können solche in der Morphologie in Erscheinung tretenden Merkmale einen Weg weisen, Gebiete des VK auch unter sehr flacher TG - Überdeckung für eine Detailexploration abzugrenzen. Wertet man nun die Kombination der Strukturdaten aus Luftbild (niederfrequente Information, weich begrenzte Intensitätsverteilung) und TM5-Plast (hochfrequente Information, scharf begrenzte Intensitätsmuster) unter diesen Gesichtspunkten aus, so zeigt Abb.62 S.123 das Ergebnis.

Im Vergleich mit den vorliegenden geologischen Daten zeigt sich:

- Konzentrische Strukturumrahmung von Vulkanitkomplexen wird durch die Überlagerung deutlich (F 3-8,G-J 12-19, B 15-18)
- Maximale Strukturdichten kennzeichnen im Verlauf des nördlichen und südlichen VK - Zuges massige Vulkanitkörper (M 2-4, DE 11, H 16)
- Zwei E-W streichende Züge höherer Strukturdichten im Mittelteil und N des Testgebiets begrenzen den nördlichen VK - Zug
- Übergreifen hoher Strukturdichten von kartiertem VK auf angrenzenden TG, einzelne VK - Fenster lassen vermuten, daß hier weitere VK - Serien in flacher Teufe liegen (HI 3-8, E 10/11, D 16-18, FG 17-19)
- Stark Grauwackenführende TG - Serien zeigen ebenfalls höhere Dichten (Puerto Rayo E 15-18)
- Abbaue und Halden um Tharsis ergeben durch Überdeckung keine sinnvollen Daten, bleiben unberücksichtigt (I 17-19)

Abb.62 Interpretation der DS - Kombination TM5-PLAST + LIN-DICHTE (vgl. Bild 1, Falttasche)

Gegenüber der Einzelauswertung beider DS (Kap.II/2.3. und III/2.1.) ergeben sich als Vorteile:

* synoptische Betrachtung verstärkt die Konturen vulkanischer Körper im VK
* trennbare DS - Informationen ermöglichen Differenzierung und Aussonderung von Anomalien im TG
* durch Abbildung von Flüssen, Stauseen und Höhenrücken ermöglicht TM5-Plast eine gute Orientierung

Nachteilig wirkt sich der "Perlschnureffekt" der LIN-Dichte aus, hervorgerufen wird er als kleinflächige Maskierung von Strukturen durch kleine Aufforstungen, Felder usw. Die gute Synopsis gestattet jedoch eine gute Interpolation hoher Dichten. Haldenüberdeckungen, Tagebaue, Straßen und Eisenbahnanlagen müssen natürlich beim TM5-Plast unberücksichtigt bleiben (unschwierig im Testgebiet, die Unterscheidung ist bei der hohen Auflösung der TM - Daten und den geringen Zahl dieser Phänomene leicht möglich).

Folgende Gebiete erscheinen für eine weitere Untersuchung auf anstehenden bzw. flach überdeckten VK interessant:
H-K 2-7, GH 7-11, DE 10/11, DE 14-18, FG 17-19, H 12

2 KOMBINATION VON OBERFLÄCHENINFORMATION VON TM4 MIT AEROMAGNETISCHEN DATEN (TM4+MAG)

Inwieweit liefert die Kombination von Daten der magnetischen Totalintensität mit einem hochauflösenden Satellitenbild (TM) Erklärungen für magnetische Anomalien und großräumige Hochs? Dies umreisst die wichtigsten Erwartungen an dieses Produkt. In den kontrastverstärkten TM4 - Daten lassen sich einige wichtige geologische und strukturelle Phänomene der VK - Serien zusammen mit Spuren bergbaulicher Aktivitäten erkennen. So sind etwa die lihologisch abwechslungsreichen VK - Züge im N - Teil (C-F 4-18), im SW (K-M 2-8) und im SE (G-J 13-19) in Umrissen sichtbar, speziell die basaltischen Extrusiva im SW - Teil heben sich durch ihre intensive ackerbauliche Nutzung von der Umgebung ab. Das durch den flachen Sonnenstand gut skulpturierte Gelände und die hohe spektrale Dynamik zwischen brachen und bewachsenen Flächen bieten als orientierende Unterlage beste Bedingungen zur Lokalisierung der magnetischen Phänomene. Durch die starken Dynamikunterschiede zwischen kleinräumigen (i.a. 40nT) und großräumigen Anomalien (20nT) konnten mit der angewandten Spreizung der magnetischen

Signaldynamik auf maximal mögliche Parallaxen im Stereobild deutlich beide unterschiedlichen Gruppen von Anomalien sichtbar gemacht werden. Die thematische Interpretation zeigt Abb. 63.

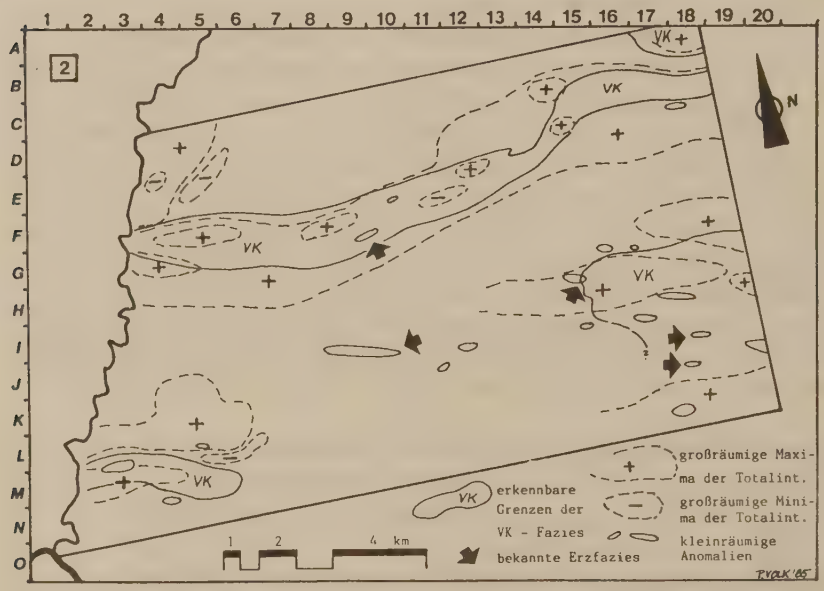


Abb.63 Interpretation der DS - Kombination TM4 + MAG (vgl. Bilder 2+3, Falttasche)

Man kann deutlich zwei Arten magnetisch auffälliger Phänomene auseinanderhalten, so zeichnen sich großräumige Hochs und Tiefs durch geringe Dynamik und Gradienten aus (z.B. C 12-18, H 14-18, KL 2-6), andererseits existieren eine Vielzahl kleinerer Anomalien mit steilen Gradienten und größerer Dynamik (z.B. I 9/10, F 10, L 3). Letztere weisen auch in der vorliegenden Verarbeitung meist ein deutliches Maximum mit nördlich anschließendem Minimum auf (induzierte Magnetisierung steilstehender Körper, vgl. III/ 2.2.1.2.).

Vergleicht man diese Erscheinungen mit den Informationen aus TM4 und den geologischen Daten, so zeigt sich:

- alle kleinräumigen Anomalien liegen in der bekannten VK - Ausdehnung
- lediglich drei erstrecken sich in den TG hinein (I 9/10,G 16,G 17)
- großräumige Hochs halten sich größtenteils ebenfalls an die bekannte VK - Ausdehnung

- Ausnahmen gelten für KJ 4/5, GH 4-8, D15-C18, F 17-19, H 13-15, hier zeigt sich eine geringfügig höhere Totalintensität in kartiertem TG
- drei bekannte Erzvorkommen sind direkt mit kleinräumigen Anomalien zu korrelieren (I 9/10, I 19, J 18; Herrerias, Filon Norte, Filon Sur)
- zwei weitere zeigen Anomalien in nächster Nähe (F 10, H 15; Cura, Lagunazo). Die Vorkommen sind gut durch die Spuren bergbaulicher Tätigkeit im TM4 zu erkennen.

Gegenüber den Einzeldaten ergeben sich für die DS - Kombination als Vorteile:

* synoptische Betrachtung verdeutlicht die Korrelation magnetischer Hochs und kleinräumiger Anomalien mit VK - Serien
* Verdeutlichung auch geringer Unterschiede in der Totalintensität. Schwache Hochs und Nähe zum VK macht an einigen Stellen eine Tiefenfortsetzung unter kartiertem TG wahrscheinlich, diese Information ist aus dem Kartenmaterial mit 10 nT Isolinienabstand nicht abzuleiten
* Beide DS sind in ihren Informationsgehalt trennbar
* TM4 ermöglicht eine präzise Zuordnung von magnetischen Phänomenen mit sichtbaren lithologischen Körpern und Abbauaktivitäten (bekannte Erzfazies)
* Die räumliche Begrenzung der magnetischen Messwerte ist durch den Stereoeffekt exakt markiert, dies gilt auch für die Datenlücken

Nachteilig wirkt sich bei extremen Magnetik - Maxima der Plateaueffekt aus, so ist die absolute "Höhe" für Anomalie I 9/10 und L 3 nicht abzuschätzen. Auch wäre eine deutlichere spektrallithologische Differenzierung aus den TM - Daten für eine Korrelation mit der Magnetik wünschenswert, erst der zusätzliche Vergleich mit der geologischen Karte bietet für viele Serien ausreichende Sicherheit. Schließlich ermöglicht nur die Verwendung eines Stereoskops eine detaillierte Auswertung, dies bedeutet einen gewissen Nachteil für ungeübte Stereointerpreten.

Für eine weitergehende Exploration auf mögliche VK - Ausdehnung empfehlen sich die Bereiche KJ 4/5, GH 4-10, D15-C18, F 17-19, H 13-15. Einige der kleinräumigen, starken Anomalien sind potentiell interessant für Hinweise auf lokal erhöhte Magnetit- bzw. Magnetkiesgehalte und damit u.U. auch auf Kieserzkörper.

3 KOMBINATION DER SPEKTRALLITHOLOGISCHEN INFORMATIONEN AUS VERARBEITETEN TM-DATEN (TM5+TM-PC1+TM-DOPPELRATIO)

Mit dieser Kombination sollen spektrallithologische und strukturelle Aussagen aus den TM-Daten und ihren Verarbeitungen abgeleitet werden. Erwartet wird mit TM5 eine gute strukturelle Differenzierung, die erste Hauptachse (PC) der TM - Kanäle 3,4,5,7 zeigt noch die deutlichsten Unterschiede in der Lithologie der VK - Serien und das Doppelratio bietet Informationen über hohe Gehalte an Gossan - Mineralen. Das resultierende Bild sollte also eine Vielzahl von strukturellen und lithologischen Details in Farbfrequenz, Sättigung und Textur differenzieren helfen. Bei näherer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, daß Vegetationseffekte sowohl im TM5 als auch in PC1 dominieren und lithologische Informationen kaum zum Vorschein kommen lassen. Das die Sättigungskomponente kontrollierende Doppelratio ist selbst bei großen Schwankungen nicht aufzulösen. Durch die starke Farbstreuung der PC1 erscheinen damit alle drei verwendeten DS visuell kaum mehr trennbar. Die Interpretation zeigt nur wenige, sicher bestimmbare geologische Details (Abb. 64,S.128).

Als Ergebnisse bleiben für diese DS - Kombination festzuhalten:
- einige Bereiche massiger, saurer bis basischer Vulkanite heben sich wenig deutlich von umgebenden Serien ab (F 4-8, GH 16-18, K 7, LM 6/7, M 3-5, I 18/19)
- Geologische Strukturen sind oft nicht eindeutig von vegetationsbedingten Grenzen zu unterscheiden
- Gossanmineral-haltige Oberflächen können kaum bestimmt werden

Betrachtet man die Quellen - DS, so beinhalten sie für sich ausgewertet insgesamt mehr geologisch relevante Informationen. So kann für diese DS - Kombination nur eine ausreichend gute Orientierungsgrundlage bestätigt werden.

Abb.64 Interpretation der DS - Kombination TM5 + PC1 + DR (vgl. Bild 4, Falttasche)

Nachteilig wirken sich aus:

* alle drei DS sind schwierig bis nicht visuell trennbar dargestellt, der Erscheinung der drei Komponenten Intensität, Farbfrequenz und Sättigung lässt sich kaum in einzelne Anteile auflösen
* die Sättigungsinformation (Doppelratio) lässt durch die Dominanz des Farbwechsels (PC 1) nicht mehr die interessanten Flächen erkennen
* der Gesamteindruck der Darstellung wirkt grundsätzlich verwirrend durch starke kleinräumige Variationen der drei IHS - Komponenten

Dazu kommt der relative geringe thematische Aussagewert von TM5 und PC1, die auch als einzelne DS keine wesentlichen und neuen Informationen für Explorationszwecke im Testgebiet liefern. Insgesamt gibt also diese Kombination keine Hinweise, ob nun direkt oder indirekt, auf die Kieserzfazies.

4 KOMBINATION AUS STRUKTURINFORMATION DES TM5 UND SPEKTRAL-LITHOLOGISCHEN DATEN DES TM-DOPPELRATIOS (TM5-PLAST+TM-DR)

Mit dieser Kombination sollte eine Darstellung struktureller Phänomene aus TM5-Pseudoplast zusammen mit dem spezifisch auf limonitische Oberflächen ausgerichteten TM - Doppelratio zu einem Produkt erfolgen, das die Verteilung spektraler Anomalien auf einer geologisch-strukturellen Grundlage zeigt. Um nicht zu viele Eigenschaften der FE - Daten auf einmal zu zeigen und dadurch wie bei Bild 3 bei der Interpretation Verwirrung zu stiften, wurde Farbfrequenz und Sättigung durch den Doppelratio - DS gemeinsam moduliert. In Bezug auf die strukturelle Unterlage und mit geologischen Daten ergibt sich als Interpretation Abb. 65.

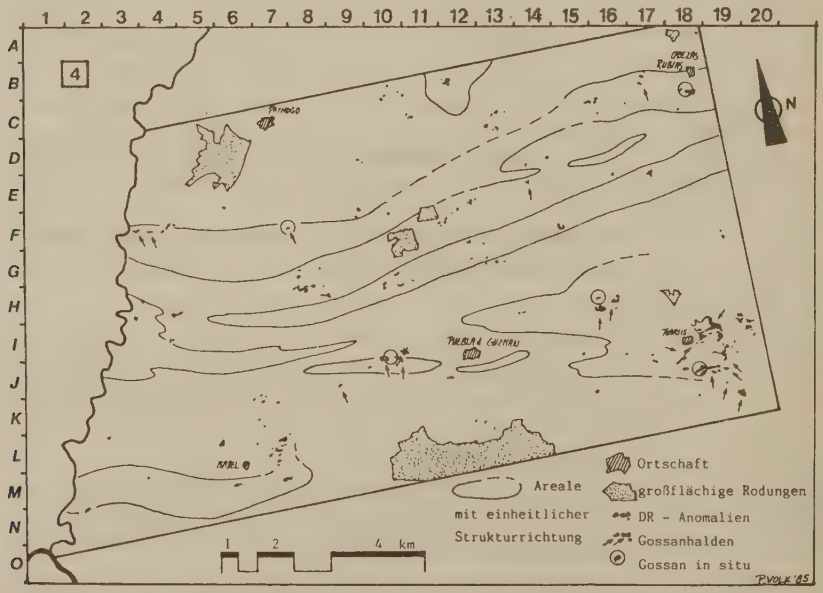


Abb.65 Interpretation der DS - Kombination TM5-PLAST + TM-DR (vgl. Bild 5, Falttasche)

Als Ergebnisse sind festzuhalten:

- einige großflächige Anomalien sind klar an ihrer Form und Ausdehnung als frische Rodungsflächen durch Geländevergleich zu bestimmen, sie zeigen auch rot-violetten Farben (F 10/11, H 18, L 10-14, D 5/6)
- viele kleine Anomalien entlang Bachläufen und Stauseen sind als uninteressant auszusondern (Zusammenschwemmungen) (I8-H12, I 18, L 3)

- von allen übrigen Anomalien zeigen 17 oxidische Halden und für fünf lassen sich Gossan - Minerale über oberflächennahen Erzkörpern (Pfeile und Kreise) nachweisen
- mit Ausnahme von Cabezas del Pasto (J9) liegen alle genannten Anomalien in stark skulpturiertem VK
- alle kleinflächigen, verbleibenden Anomalien im Bereich des VK sind potentiell für einen Vergleich mit anderen Hinweisen auf Erzfazies interessant

Diese Verarbeitung bietet gegenüber der Bearbeitung der einzelnen DS wesentliche Vorteile:

* die wichtigsten Informationen (niedrige Doppelratiowerte werden durch stark gesättigtes Rot und Magenta visuell verdeutlicht
* durch Synopsis können Anomalien, die an Bach- und Flussbetten sowie an Stauseen gebunden sind, gut ausgesondert werden
* Anomalien im Bereich stärker strukturierter Bereiche (VK) sind als potentiell interessant zu betrachten
* durch die detaillierten strukturellen Informationen des TM5-Plast wird ein Orientierung der Anomalien möglich
* die meisten Ortschaften sind sowohl durch die Textur der umgebenden Anbauflächen als auch durch gelbe bis orange Farben der Ortskerne sichtbar

Nachteilig wirkt sich aus, daß nicht alle Strukturen des TM5-Plast auf geologische Ursachen zurückzuführen sind; hier müssen zusätzliche Kriterien bei der Absicherung helfen. Auch frisch gepflügte und gerodete Flächen zeigen niedrige Doppelratiowerte, sie können aber an Ausdehnung, Form und dem Fehlen extremer Werte (magenta) von Gossan und limonitischen Halden unterschieden werden.
Insgesamt aber demonstriert diese Kombination sehr gut die Fähigkeit einer IHS - Transformation zur Darstellung weitgehend unabhängiger Fernerkundungs - DS speziell für die Exploration. Alle roten Farbflächen, die offensichtlich keine landwirtschaftlichen Ursachen haben und im Bereich des erkennbaren VK liegen, erscheinen potentiell interessant für eine Überprüfung.

5 KOMBINATION DER INFORMATIONEN AUS TM4 MIT THORIUM- UND KALIUM-GAMMA-SPEKTROMETRIE (TM4+Th+K)

Die hohe Korrelation der Messwerte der Th- und K-Spektrometrie mit kartierten Vulkaniten des VK war hier Anstoss zu einer spektrallithologisch differenzierenden DS - Kombination auf der Grundlage hochauflösender TM - Daten. Farbgrenzen und Parallaxe wurden so gewählt, daß eine Korrelation von Farbe und bekannter Geologie der Vulkanite am augenfälligsten ist, d.h. eine optimale Differenzierung zwischen Messwerten basaltischer und rhyolitischer, K-reicher und -armer Vulkanite besteht (vgl. geologische Karte, Abb.5 S.18b). Eine Auswertung unter dem Stereoskop zeigt folgendes Bild (Abb.66).

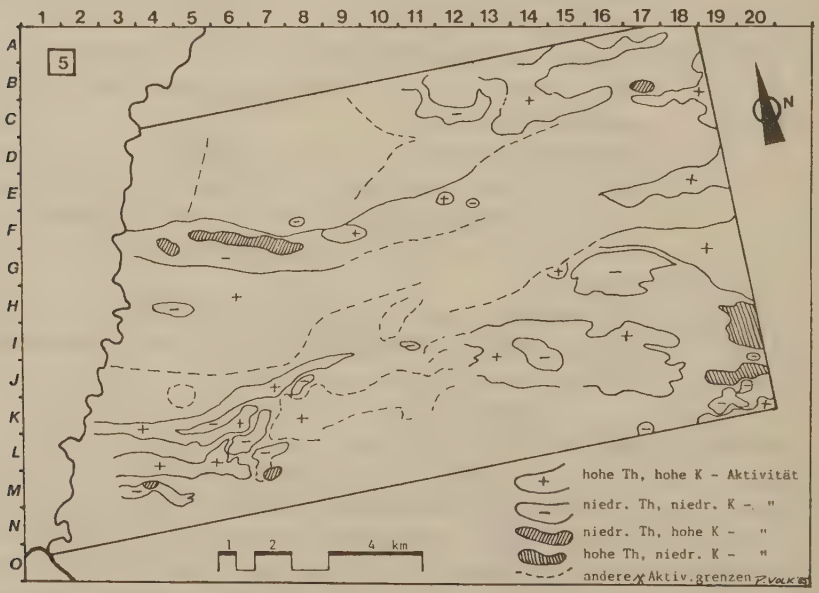


Abb.66 Interpretation der DS - Kombination TM4 + Th + K (vgl. Bilder 6+7, Falttasche)

Die Ergebnisse der Auswertung zusammen mit geologischen Daten sind:

- andesitische, trachytische und basaltische meta-Vulkanite sind als blaue Flächen ausgezeichnet abzugrenzen, meta-Rhyolithe und Rhyodazite lassen sich als rot markierte Züge und Komplexe im Verlauf der VK - Züge erkennen, vgl. geol. Karte S.19b (I-M 3-8, F 4-10, G-K 14-20, BC 11-18). Einige dieser Einheiten sind im TM4 ebenfalls zu erkennen und gemeinsam besser kartierbar

- große Flächen bekannter TQ- und TG - Ausdehnung zeigen türkise, grüne, gelbe bis orange Farbtöne, also mittlere Gamma-Th - Aktivitäten (etwa GH 12-14, D 8)
- K - Messwerte korrelieren weitgehend mit Th, d.h. höhere Th - Aktivität ist häufig mit höherer K - Aktivität gekoppelt und umgekehrt (JK 5-7, G 16/17)
- niedrige Messwerte werden über größeren Oberflächengewässern registriert, Grund: Gamma - Absorption (vgl. H 16, H 18/19, I 11) TM4 erlaubt eine visuelle Korrektur
- selbst Gebiete mit kleinen Aufschlüsen vulkanischer Serien im TG zeigen höhere Messwerte (rhyol.Tuffe) als umgebender TG (G-I 4-8, FG 17-19, CD 15-18). Die Ausdehnung dieser Bereiche reicht an vielen Stellen über kartierte VK - Fenster hinaus!
- die zum VK zählende Formation "Cerro Mendez" lässt sich durch ihr Strahlungsverhalten eindeutig als VK festlegen (rhyol. Tuffe, DE 4/5). Im Gelände ist diese Unterscheidung zwischen Tonschiefern (TG) und Tuffen (VK) weniger eindeutig.
- nur wenige Stellen zeigen deutliche Gegenkorrelationen beider spektrometrischen DS: niedrige Th, hohe K: F 4-8, B 17, M 4, M 7; hohe Th, niedrige K: H-J 19/20; sie liegen <u>alle</u> im unmittelbarer Nähe bekannter Erzfazies (Tharsis,Rica,Isabel,Sa.d.Carmen, Cura,Romanera). Die einzige Ausnahme bildet Herrerias
- Topographisch abhängige Messfehler sind beim Vergleich mit der hochauflösenden Satelliteninformation nicht festzustellen

Betrachtet man die einzelnen Quellen - DS und diese Kombination, so kann man eine ganze Reihe von Vorteilen für eine solche Verarbeitung geltend machen:

* die geophysikalischen Daten sind mit unterlagernder TM4 - Information ausgezeichnet orientierbar
* Korrelationen zwischen Th und K sind leicht festzustellen und auch nach ihren absoluten Werten einzuordnen (Unterschied zum Ratio!)
* Korrektur der nicht-lithologischen Phänomene wird vereinfacht (Wasserabsorption)
* Korrektur um Werte über Halden wird vereinfacht
* Zuordnung zu lithologischen und strukturellen Einheiten ist mit TM4 <u>und</u> Gamma - Messwerten sicherer
* Strukturen und Textur im TM4 erleichtern eine Extrapolation der Gamma - Messwerte am Rand des Messgebiets und in Datenlücken

Als Voraussetzung gilt jedoch eine stereoskopische Betrachtung, monoskopisch wirken die Kombinationen durch "Pixel-Verschiebungen" verwirrend auch in der Farbinformation. Wenige absolute Extrema werden durch Histogrammstreckung unterdrückt, um andererseits kleinere Variationen um den Mittelwert der jeweiligen Aktivität besser sichtbar zu machen. Da aber mehr die Verteilung zwischen 10 und 20 cps (Th) bzw. 5 und 40 cps (K) für die thematische Interpretation interessant erscheint, ist kein thematischer Informationsverlust vorhanden.

Bedeutsam erscheinen drei Ergebnisse:

a) es sind Rückschlüsse auf den SiO_2 - Gehalt der Vulkanite möglich
b) es kann auf anstehende (schlecht kartierbare Tuffe in TG-Tonschieferumgebung) VK - Serien geschlossen werden
c) Deutliche Gegenkorrelationen könnten Hinweise auf benachbarte Erzfazies geben, dies ist nur ein <u>empirisch ermittelter Zusammenhang</u> (vgl.Kap.II/2.5.). Anomalien niedriger Th- und hoher K-Werte sind nach Geländevergleichen weitgehend identisch mit K-reichen, intermediären Vulkaniten (vgl.Kap.II/2.4.2.2.), die Anomalie mit umgekehrtem Verhältnis bei Tharsis lässt sich mit extrem SiO_2-reichen meta-Rhyolithen ohne erkennbaren Orthoklas- und Serizitgehalt erklären.
   Insgesamt gilt für diese Kombination eine wesentliche Steigerung des Informationswertes der Quellendaten.

[6] KOMBINATION AUS TM4 MIT AEROMAGNETISCHEN UND ELEKTROMAGNETISCHEN MESSUNGEN (TM4+EM+MAG)

Sehr viel direktere Informationen über Vererzungen soll die Kombination der elektromagnetischen und magnetischen Daten mit TM4 - Daten geben. Die Werte des scheinbaren spezifischen Widerstands kontrollieren die Farbfrequenz, wobei signifikante Werte die Farbübergänge blau/grün (100 Ωm) und gelb/rot (20 Ωm) markieren. Die magnetischen Messdaten wurden analog zur DS - Kombination [2] für die Berechnung der Parallaxe verwendet. Als Intensitätskomponente liefert wieder TM4 die visuelle Unterlage für Orientierung und Korrektur. Die Ergebnisse einer Musterinterpretation zeigt Abb. 67,S.134.

Abb.67 Interpretation der DS - Kombination TM4 + EM + MAGNETIK (Bilder 8+9, Falttasche)

Ergebnisse der Auswertung dieser DS - Kombination:

- anthropogen begründete Widerstandsanomalien können durch die hochauflösende TM - Information leicht erkannt und ausgesondert werden (Hochspannungsleitung L15-I20, Ortschaften Alosno K19 und Tharsis I18, sowie verschwemmte Haldendeposite in Flusstälern GH7 und K5, Halden der Abbaue Lagunazo H16 und Tharsis I19)
- verbleibende Widerstandsanomalien zeigen eine gute Deckung bekannter Erz- und Schwarzschiefervorkommen. Rote Farben (<20 Ωm) zeigen lediglich die bekannten, großen Vorkommen um Tharsis. Sonst weisen nur noch Anomalien bei B15, I17, J18 und N5 Widerstände auf, die auf Vererzungen deuten könnten
- die geologischen Aussagen bezüglich TM4 und Magnetik gelten wie unter 2 besprochen
- die Synopsis von EM und Magnetik wenige, aber signifikante Übereinstimmungen. So bei Herrerias I 10/11 und um Tharsis IJ 19, wo bekannte Kieslager und ihre Gehalte an magnetischen Mineralen die Stärke der Anomalien bestimmt
- Insgesamt halten sich die kleinräumigen magnetischen Anomalien

weitgehend an bekannte VK - Strukturen, während EM - Anomalien darüber hinausgreifen können
- TM4 bietet wiederum eine gute orientierende Grundlage

Gegenüber den Quellendaten lassen sich als Vorteile erkennen:

* Selektion und Korrektur von EM - Anomalien wird erleichtert
* Korrelation wichtiger VK - Strukturen durch Magnetik und TM4 wird möglich
* gute Vergleichsmöglichkeiten für EM und Magnetik (direkte Hinweise auf Erzfazies)
* Lokalisierung und Orientierung der geophysikalischen Anomalien wird von TM4 unterstützt

Da die EM - Daten nicht als Quellendaten in digitaler Rasterform vorlagen, mußten sie über eine Kartendigitalisierung erst integrierbar gemacht werden. Technisch bedingt sind daher Datenlücken und die genaue Abgrenzung des Messgebiets nicht an Änderungen der Farbfrequenz nicht zu erkennen. Sie entsprechen aber den unter dem Stereoskop sichtbaren Grenzen der magnetischen Messdaten und können daher auf diese Weise mitberücksichtigt werden. Leider verschwanden durch die notwendige Interpolation einige sehr kleinflächige Widerstandsminima in der Größenordnung von 100 m Ø und um die 50 Ωm. Die Geländerecherche aber zeigte, daß alle diese Anomalien für Zwecke der Exploration uninteressant sind, weil sie mit - größeren Straßenbaumaschinen
- Sedimenten kleinster Stauweiher

in Zusammenhang gebracht werden konnten. Alle größeren Phänomene wurden nicht wesentlich beeinflusst.
Als Zielgebiete für eine detailliertere Bodenaufnahme scheinen die Bereiche C-F 3-6, B-D 14-17, GH 15-19, I 13-17, L-N 2-6 interessant. Durch sich deckende EM und Magnetikanomalien sollten besonders B 15, H 18, M 3, I 16 näher untersucht werden.

7 KOMBINATION AUS LUFTBILD MIT ELEKTROMAGNETISCHEN UND GRAVIMETRISCHEN DATEN (LB+EM+GRAV)

Um als Referenzdaten zu EM die thematisch zuverlässigeren gravimetrischen Messungen synoptisch beurteilen zu können, um auch in kleinem Masstab mit einem Luftbild als orientierende Grundlage Schlüsse über Brauchbarkeit von DS - Kombination ziehen zu

können, wurde dieses Produkt konzipiert. Ein digitalisiertes Luftbild als Intensität, der scheinbare spezifische Widerstand als Farbfrequenz (analog [6]) und schließlich Bouguer - Schweredaten als Sättigungskomponente ergeben die Kombination, eine Interpretation ergibt folgendes Bild (Abb.68).

[7]

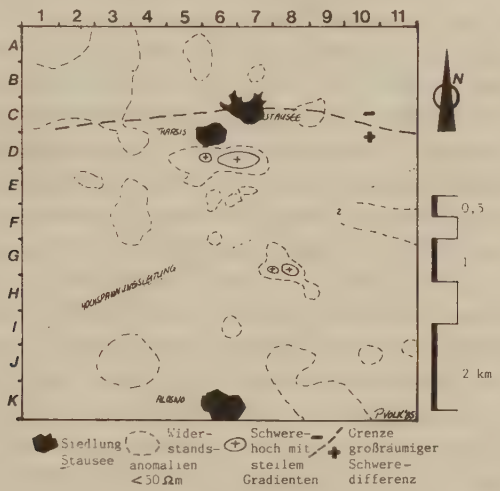


Abb.68 Interpretation der DS - Kombination LUFTBILD + EM + GRAV. (Abb.53,S.105, links)

Ergebnisse der Interpretation sind:

- Korrektur von Widerstandsanomalien durch die Luftbildinformation
  1.Ortschaften Alosno K6 und Tharsis CD56
  2.Bahnanlagen der Ca. Tharsis S.A. EF89
  3.Hochspannungsleitung von I1 bis D11
  4.mächtige Haldenüberdeckung CD78
- Verbleibende Anomalien zeigen Extremwerte nur bei den Erzkörpern des Filon Norte Tagebaus und bei Almagrera (D 6/7, G 7/8), alle weiteren bewegen sich in der Größenordnung von >50 Ωm (gelb)
- Starke Sättigung der Farbe zeigt sich nur am Filon Norte Tagebau (D 6/7), dort zeigt sich die mit Abstand größte positive Dichteanomalie
- Eine deutliche Sättigungsabnahme von wenig nach mittel gesättigt verläuft etwa von C1 bis C11, sie markiert hier eine großräumige Dichteabnahme von Vulkaniten zu Sedimenten des VK.

Diese DS - Kombination zeigt, daß prinzipiell eine Koppelung von geophysikalischer Information an die Sättigungskomponente möglich ist. De facto lassen sich visuell aber nur maximal drei Sättigungsstufen eindeutig unterscheiden:

--- stark gesättigt (Filon Norte)
--- mittel gesättigt (mittlerer Bildteil)
--- schwach gesättigt (N des Bildes, Ränder ohne gravimetrische Information)

Dies bedeutet aber für einen thematisch so wichtigen DS wie der Gravimetrie einen deutlichen Informationsverlust. Dichteanomalien in der gravimetrischen Karte bei Almagrera und bei vielen anderen größtenteils abgebauten Erzkörpern dieses Bildausschnittes verursachen keine visuell unterscheidbare, höhere Sättigung. Die Information der EM - Daten wird dagegen ausreichend genau sichtbar. Die als digitalisiertes Luftbild - Negativ integrierte Intensitätskomponente bietet trotz ihrer fehlenden Entzerrung eine ausgezeichnete Orientierungs- und Korrekturgrundlage. Etwas verwirrend wirkt sich der irreguläre Schnitt der gravimetrischen Daten auf den Interpreten aus. Nachteilig ist auch, daß mögliche Anomalien, die durch Vererzungen verursacht werden, aber mit oberflächennahen Widerstandsanomalien zusammenfallen, nicht berücksichtigt werden können.
Für die Exploration ergeben sich für dieses Gebiet keine Ziele hoher Priorität auf der Grundlage dieses Produkts. EM - Anomalien bei BC 2/3, AB 2/3, EF 3/4, und mehrere um Alosno (K6) könnten Hinweise auf schwache Vererzungen in flacher Teufe geben.

2.2. Zusammenfassung der Interpretationen

Alle sieben diskutierten DS - Kombinationen stellen Versuche dar, wichtige Parameter für die Übersichtsexploration auf Kieserze interpretationsoptimiert sichtbar zu machen. Die angewandten Methoden der Berechnung solcher DS - Kombinationen und ihre Auswertung lieferten unterschiedliche Ergebnisse.
Für die visuelle Integration und Interpretation zweier DS zeigten sich als geeignet:

--- Addition verschieden frequenter Informationsebenen
--- Synthetisches Stereo (Parallaxenbilder)
--- Intensität, Farbfrequenz, Sättigung (IHS, S konstant oder wie H korreliert)

Sehr günstig erwies sich bei den letzten beiden Möglichkeiten die Verwendung von multispektralen Satellitendaten und Luftbildern als Intensitätskomponente. Der Addition kommt dabei nur bei speziellen Verhältnissen der Quellen - DS Bedeutung zu. Die Farbfrequenz ermöglicht eine gute und detaillierte Zuordnung, während die Sättigungskomponente eine zu geringe quantitative Differenzierung zulässt (max. drei Stufen). Die Einbeziehung eines DS als dritte Dimension schließlich erfüllte voll die Erwartungen in Synopsis und Trennbarkeit von verschiedenen Informationsebenen. Versucht man aus drei DS eine optimale Kombination zu erzeugen, so erscheint mir ein IHS - SST die geeignete Form. Wenn speziell FE - Daten mit geophysikalischen Informationen gemeinsam dargestellt werden sollen, kann sich mit dieser Methode eine deutlich verbesserte Interpretationsgrundlage ergeben (vgl. Kombinationen [5] und [6]).
Bei der vorliegenden Beurteilung der sieben DS - Kombinationen stellte sich heraus, daß zwei gegenüber den Quellendaten eine deutlich verminderte Interpretationsfähigkeit zeigen ([3] und [7]), alle anderen dagegen oft wesentlich gewinnen.

Mit Kriterien, die an Hand der Quellendaten erarbeitet wurden, könnten potentiell interessante Bereiche für eine weitergehende Detailexploration festgelegt werden. Da diese Kriterien nur für eine erhöhte Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Phänomens stehen, möchte ich hier die Interpretationsergebnisse zusammenfassen. Es ist zu erwarten, daß bei einer Synthese der Auswertungen von drei bzw. vier weitgehend unabhängigen Interpretationskriterien eine Steigerung der gewünschten Aussagesicherheit erreicht werden kann.

Zwei wichtige Aussageschwerpunkte können unterschieden werden. Einmal indirekte Hinweise, das sind solche auf weiteren, bisher nicht kartierten, anstehenden oder in flacher Teufe liegenden VK zur näheren Untersuchung auf Anomalien der Erzfazies; zum anderen direkte Hinweise auf solche Anomalien selbst. Abb.69,S. 138a sammeln die Ergebnisse aller sieben Auswertungen unter diesen Gesichtspunkten. Daß beide Karten wirklich zuverlässige Informationen liefern können, wird durch den Vergleich mit bereits bekannten geologischen Informationen gezeigt werden.

Abb. 69. Zusammenfassung der Interpretationsergebnisse nach den Aussageschwerpunkten (B) und (C)

Zu Abb.69 S.138a (B):

In der geologischen Karte (Abb.5 S.18b) wurden einige sporadische Aufschlüsse von VK - Serien innerhalb des TG festgestellt. Vergleicht man ihr Auftreten im TG zwischen nördlichem und südlichem VK - Zug, so zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung mit Zonen erhöhter Wahrscheinlichkeit (2-3 Kriterien positiv). Für mögliche Bereiche flacher TG - Überdeckung N des nördlichen VK - Zuges ergibt sich schon aus der Profilaufnahme (Abb.20 S.36a, Anhang 1) eine Übereinstimmung mit dem tektonischen Bau und abtauchendem VK. Das Erzlager von Sao Domingos W des Rio Chanza und unmittelbar an der Grenze des Testgebiets ist ebenfalls im VK aufgeschlossen, eine Zone mit Wahrscheinlichkeit für anstehenden oder in flacher Teufe liegenden VK östlich des Rio Chanza (HI 3-7) liegt genau in seiner östlichen Fortsetzung.

Zu Abb.69 S.138a (C):

Vergleicht man die Verteilung der ermittelten Anomalien mit den Daten über bekannte Erzlager und Mineralisationen (Abb.69 (A)) und Abb.56 S.119a, so zeigt sich:

--- von sechs Häufungszonen bekannter Erzfazies (Tharsis H-J 17-20, Herrerias IJ 9/10, Rica BC 16/17, Sierrecilla/Preciosa EF 10/11, Carmen/Silos/Romanera FG 4-7, Isabel LM 6/7) weisen fünf (außer Sierrecilla/Preciosa) eine deutlich erhöhte Konzentration von Anomalien auf

--- andere Cluster zeigen sich bei:

* W San Isabel (M 3/4)
* NE San Isabel (L 7)
* W Tharsis (I 14-16)
* N Tharsis (G 17-19)
* SW Cabezas Rubias (C 15/16)
* SW Paymogo (DE 4-6)

--- die meisten Anomalien liegen in kartiertem VK, an der Grenze VK/TG und auch in den Gebieten vermuteter, geringmächtiger TG - Überdeckung (H4, J5, G8, G10, C 17/18). Eine einzige bemerkenswerte Ausnahme ist ein großflächiges, aber schwaches Widerstandsminimum NW Tharsis (EF 16).

VI. DISKUSSION

Aus den vorangegangenen Untersuchungen zu geologischen Parametern der Erzbildung und einer selektiven Auswertung interpretationsoptimierter DS können Empfehlungen für die Exploration auf Kieserze im Testgebiet, im Kiesgürtel und geologisch ähnlich gebauten Regionen abgeleitet werden. Von einer analogen Vorgehensweise könnten nicht nur Arbeiten mit anderen Explorationszielen, sondern auch andere geowissenschaftliche Disziplinen mit entsprechender Problemstruktur profitieren.
Sowohl Fragestellung als auch Eigenschaften verfügbarer DS kontrollieren die Einsatzmöglichkeiten von DS - Kombinationen in der Anfangsphase eines rohstoffwirtschaftlichen Projektes. Mit ein wichtiges Ziel dieser Arbeit soll dabei die Diskussion über eine Strategie in der Übersichtsexploration zur verbesserten Auswertung verschiedener, explorationsrelevanter DS sein.

1. Ergebnisse und Schlussfolgerungen für das Testgebiet

1.1. Übersichtsexploration

Die lithostratigraphischen und tektonischen Untersuchungen bieten mit Ausnahme der Festlegung von Prioritätszonen kein Verfahren, um eine potentiell interessante Erzfazies mit hoher Sicherheit zu lokalisieren. Auch alle großflächig verfügbaren DS ergeben für sich nach einer kritischen Prüfung ihres thematischen Informationsgehaltes keine sicheren Hinweise auf Kieserze in größeren Konzentrationen. Gründe dafür sind:

--- keine direkte Wechselwirkung mit Kieserzen
(Spektrometrie, FE, Geologie)

--- oft hoher Störsignalpegel (FE, teilweise EM)

--- mehrdeutige Anomalien
(Spektrometrie, Mag, FE, EM)

--- geringe Teufenwirkung
(Spektrometrie, FE, Geologie)

Für einige DS besteht dagegen nach Korrekturen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, Anomalien mit Vererzungen in Zusammenhang zu bringen. Als sicheres Messverfahren kann unter den Verhältnissen im Kiesgürtel nur die Gravimetrie bezeichnet werden, sie eignet

sich jedoch wegen ihrer hohen Kosten als Bodenverfahren nicht zur Übersichtsexploration.
Interpretationsoptimierte Darstellungen von DS - Kombinationen erlauben eine gleichzeitige visuelle Korrektur und Synopsis thematisch interessanter DS.
Aus den drei erarbeiteten, auswertungsverdichteten Karten

Ⓐ --- Prioritätszonen nach Nebengesteinsassoziationen (Abb.69 S.138a)
Ⓑ --- Gebiete mit vermutetem VK in flacher Teufe (Abb.69 S.138a)
Ⓒ --- Zielgebiete mit vermuteten Hinweisen auf eine Erzfazies (Abb.56 S.119a)

lassen sich nun kleinräumige Gebiete für eine detaillierte Bearbeitung festlegen.
STRAUSS et al.(1977) schlagen für die Phase der Übersichtsexploration lediglich geologische Kartierungen im Masstab 1:25000 und größer, sowie eine photogeologische Bearbeitung vor. Durch das Zuziehen weiterer geologischer und physikalischer Informationen lassen sich aber Entscheidungen für den nächsten Schritt, die Selektion von höffigen, kleinen Gebieten wesentlich besser absichern. Daß diese Methodik tatsächlich schlüssige Hinweise auf ein höheres Mineralisierungspotential zuläßt, konnte bereits unter Kap.V/2, durch den Vergleich mit bekannter Erzfazies gezeigt werden.
Als wichtige Informationsquellen für die Festlegung von Detailgebieten ergaben die Untersuchungen für das Testgebiet:

--- geologische Kartierung (Lithologie)
--- TM - Daten (Doppelratio,TM4,TM5-Pseudoplast)
--- sw - Luftbild (Luftbildlineamentdichte)
--- EM - Daten (scheinb. spez. Widerstand)
--- Magnetik - Daten (Totalintensität)
--- Gamma - Spektroskopie (K,Th-Aktivität)

Soll ein Explorationsprogramm speziell auf die Erfassung von Zielen unter TG - Bedeckung ausgerichtet sein, so können mit geologischen Kartierarbeiten nur sehr begrenzt wichtige Informationen erarbeitet werden. Hier bietet sich die kombinierte Auswertung der Karten Ⓑ und Ⓒ an.

kartiertem TG und haben meiner Ansicht nach ein hohes Potential für flach unterlagernden VK mit vereinzelten direkten Hinweisen auf Erzfazies. Die anderen vier liegen größtenteils über kartiertem VK mit z.T. bekannten, aber nicht wirtschaftlichen Vererzungen. Jeweils mehr als fünf Indizien ('direkt' und 'indirekt') sprechen für ein höheres Potential an Kiesvererzungen.

flache TG-Bedeckung:	---	2	ca. 15 km^2 SW Cabezas Rubias
	---	3	ca. 17 km^2 N Tharsis
	---	7	ca. 5 km^2 NW San Isabel
	---	8	ca. 7 km^2 SW Cerro Gibraltar
in VK-Serien:	---	1	ca. 30 km^2 SW Paymogo
	---	4	ca. 10 km^2 W Tharsis
	---	5	ca. 10 km^2 um San Isabel
	---	6	ca. 8 km^2 W San Isabel

Aus der Lage der bekannten Erzvorkommen im Testgebiet lässt sich ableiten, daß der südliche VK - Zug das höchste Potential für größere massive, aber buntmetallarme Kieserzkörper besitzt (>5 mio t). Hier sind die großen Vorkommen um Tharsis und Herrerias zu nennen. Der nördliche Zug ist charakterisiert durch kleinere Erzkörper (i.d.R. <1 mio t). Dort sind es aber Cu-, z.T. auch Pb- und Zn-reiche Kiese, die den wirtschaftlichen Wert ausmachen. Für die Gebiete 1, 2 und 8 besteht also die Erwartung im Erfolgsfall kleinere, buntmetallreiche Kieserzkörper; für alle anderen Detailgebiete eher massive, reine Schwefelkiese aufzuschliessen.

2. Überlegungen zu einer effizienten Übersichtsexploration

In einem großflächigen Explorationsprogramm ist die Übersichtsexploration eine Phase, in der oft mehr auf unsicheren als auf abgesicherten Suchmodellen die weiteren, kostenintensiveren Schritte eingeleitet werden. PETERS (1978) zeigt schematisch die Zusammenhänge zwischen Explorationsphasen, den üblicherweise eingesetzten Methoden und Kosten (Abb.71,S.144). Tab.14,S.145 zeigt die Bedeutung und Rolle der Übersichtsexploration auch in ihrer verschiedenen Nomenklatur aus der Sicht mehrerer Autoren.

Wesentlich ist das streng hierarchische Voranschreiten von einem Schritt zum nächsten, wobei die Entscheidung zum Beginn einer

neuen Phase bestmöglichst abgesichert werden muß. Der wichtigste Grund dafur sind die schnell ansteigenden Kosten in der Abfolge:

Programmplanung Vorerkundung → Übersichts-exploration → Detail-exploration → Wirtschaftlichk. Feasability

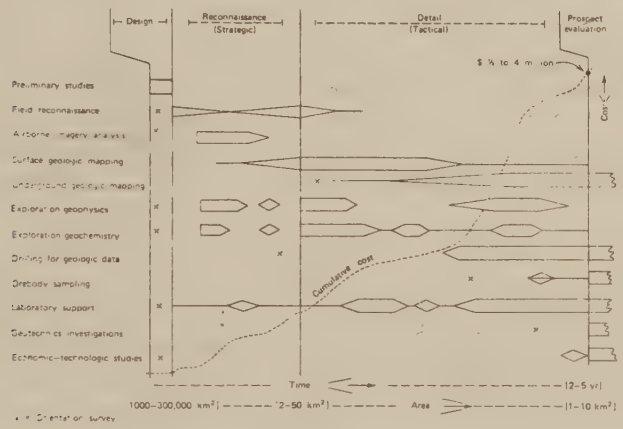


Abb.71 Massnahmen, Kosten und Explorationsphasen nach PETERS (1978)

Als wichtigstes Ziel gilt eine möglichst sichere Selektion der höffigsten Bereiche mit möglichst geringen Investitionen. Damit wird klar, daß kostenintensive geologische, geophysikalische und geochemische Bodenmethoden nach Möglichkeit erst in der Detailphase einzusetzen sind.
Geophysikalische Befliegungs- und FE - Daten stehen heute in einer räumlichen und Signalauflösung zur Verfügung, so daß sie auf der Grundlage genetischer Erkenntnisse und geologischer Zusammenhänge differenzierte Aussagen zwischen gesuchter Erzfazies und Nebengestein zulassen. Geht man davon aus, daß für viele Explorationsziele

--- bereits verschiedenartige thematische DS verfügbar sind,
--- oder solche Daten in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen aufgenommen werden können,
--- Kenntnisse über die geologischen und lagerstättenkundlichen Parameter aus bekannten Vorkommen vorliegen und
--- Erfahrungen in der Detailexploration um bekannte Vorkommen verfügbar sind

Quelle:	FORTESCUE (1965)	SAMES (1974)	PETERS (1978)	PETRASCHECK &POHL (1980)	GOCHT (1982)
PROGRAMM-PLANUNG	Detaillierter Projektplan		program design	Planung & Vorerkundung	
					Beginn der Explorations-arbeiten
ÜBERSICHTS-EXPLORATION	Regionale Basis	Großräumige Erkundung	reconnaissance	Prospektion	1.Hauptphase der Prospektion
	Interessante Gebiete	höffige Gebiete	target selection		höffiges Gebiet
DETAIL-EXPLORATION	Follow-Up Level	Detail-Erkundung	detail investigations		2.Hauptphase der Prospektion
	Bedeutende Anomalien	Nachweis von Erz	discovery	Erzkörper	Umgrenzung und Abschätzung eines Vor-kommens
					Entdeckung eines Erzkörpers
WIRTSCHAFTLICH-KEITSUNTERSUCHUNGEN AM ERZKÖRPER	Detail-Untersuchung	Nachweis der Wirt-schaftlichkeit	prospect evaluation	Exploration	1.+2.Hauptphase der Exploration

Tab.14 Bedeutung der Übersichts- und Detailexploration bei Explorationsprogrammen

so sollte sich ein effizientes System zur verbesserten Interpretation etablieren lassen, das die interpretative Bewältigung vieler verschiedener Daten nach ihrem spezifischen Informationsinhalt erlaubt. Dies wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen, da einerseits immer neue operationelle Explorationsverfahren angeboten werden, andererseits die bereits zur Verfügung stehenden Daten einer zu bearbeitenden Region eine optimale Strategie zur übersichtlichen Auswertung und Selektion höffiger Bereiche erfordern.

Thematische Auswertungen verschiedener Daten stützen sich in hohem Maße auf die Kenntnisse und Erfahrung des Explorationsgeologen und werden mit automatischen Auswerteverfahren (Klassifizierungen, statistische Korrelationsanalysen) selten den natürlichen, komplexen Verhältnissen gerecht:

"Die geologische Prospektion nach verborgenen Lagerstätten ist oft indirekt und beruht auf komplexen Überlegungen" (PETRASCHECK &POHL, 1982).

Die interpretative und selektive Leistung des Geologen muß durch eine optimale Interpretationsgrundlage unterstützt werden. Eine wichtige Voraussetzung dazu ist die Erfassung des jeweiligen Informationsgehaltes jedes DS; auch wenn dieser viele Möglichkeiten einer Fehldeutung oder Unsicherheiten aufweist, sollte keine mehrdeutige Information zu fruh ausgeschieden werden. Eine Integration verschiedener, unabhängiger Informationsquellen ergibt oft erst eine positive Entscheidung:
"It has been proven many times that, for some combination of geological or other reasons, an orebody of the type sought will not respond dramatically to a specific exploration technique, and will not produce a prominent anomaly" (COOPE&DAVIDSON,1977).

Hier können interpretationsoptimierte DS - Kombinationen im Sinne der in dieser Arbeit vorgestellten Darstellungen einen wichtigen Beitrag leisten. Eine sukzessive Auswertung sollte den Eigenschaften der einzelnen DS Rechnung tragen, so müssen etwa Informationen aus größerer Teufe und Oberflächendaten im Bewußtsein ihres unterschiedlichen Aussagewertes und ihrer Informationssicherheit behandelt werden.

Aufbauend auf den Erfahrungen dieser Arbeit im SW - iberischen Kiesgürtel kann eine anwendbare Strategie vorgestellt werden. Sie muß bei anderen Einsatzverhältnissen natürlich in einzelnen Arbeitsschritten den jeweiligen regionalen und wirtschaftlichen Bedingungen angepasst werden. Die schematische Darstellung der Phase der Übersichtsexploration zeigt Abb. 71, S. 146a. Im Vergleich zu einer Arbeitsweise, die sich wegen synoptischer Schwierigkeiten auf einen oder zwei DS beschränkt und diese getrennt auswertet, zeigen sich einige Vorteile:

Die Entscheidung für die detaillierte Bearbeitung eines Gebietes wird erst mit dem Vorliegen aller annähernd für die Fragestellung relevanten DS - Kombinationen getroffen. Durch eine synoptische Auswertung von geeigneten DS - Kombinationen mit geologischen Daten zum Ende dieses Arbeitsabschnittes kann der in die regionale Problematik eingearbeitete Geologe eine alle wichtigen Informationen berücksichtiggende Entscheidung treffen. Ein genetisches und geologisches Konzept zur Erzbildung nimmt steuernden Einfluß auf alle Untersuchungs- und Optimierungsschritte. Wichtige DS liegen in

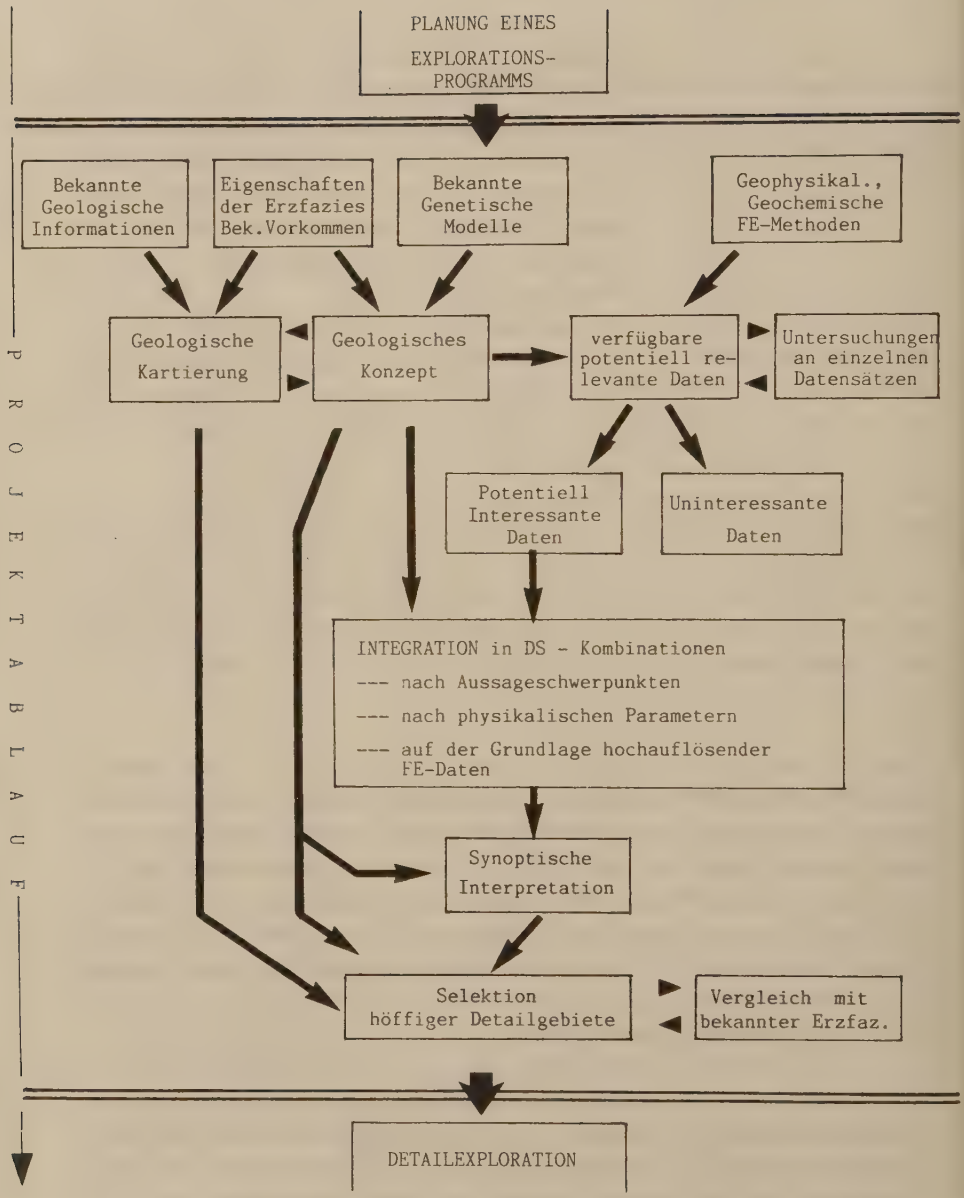


Abb.72 Arbeitsplan einer Übersichtsexploration auf der Grundlage der Arbeiten zur Lokalisierung von Detailgebieten im Testgebiet

visuell optimal auszuwertender Form vor. Mehrere unterschiedliche DS können so in eine Auswertung einbezogen werden.

Nachteilig wirken sich aus:

Das Arbeitskonzept ist komplex und verlangt eine geordnete Vorgehensweise. Die Auswahl potentiell interessanter DS für die Integration in DS - Kombinationen muß besonders sorgfältig erfolgen, da die als thematisch völlig uninteressant DS eingestuften Informationen ausgesondert werden (im Gegensatz zu potentiell interessanten DS!). Die digitale Verarbeitung und Darstellung der DS - Kombinationen erfordert einen beträchtlichen Aufwand an Hard- und Software. Schließlich wird bei DS in ungewohnter Darstellungsform (z.B. Synthetisches Stereo) eine hohe Flexibilität des Bearbeiters vorausgesetzt.

Es bleibt nochmals anzumerken, daß ein schematisches Vorgehen nach dem Muster des in dieser Arbeit verfolgten Wegs schon bei geringfugig veranderten Bedingungen (Geologie, Klima, Explorationsziel, verfugbare DS u.a.) unzutreffende Schlussfolgerungen ergeben kann:

"Imitation will get us nowhere. Case histories refer to found orebodies; we need to seek new ones" (PETERS,1978).

Eine flexible Anpassung an die regionalen und programmtechnischen Bedingungen wird sicherlich die Selektion von Gebieten für detaillierte Untersuchungen qualitativ verbessern. Die Anwendung der vorgeschlagenen Arbeitsmethodik kann natürlich auf andere Explorationsziele ausgedehnt werden, entscheidend ist bei der Integration verschiedener DS, daß diese in flachenhafter Form vorliegen und thematisch relevante Informationen beinhalten. So können ebenfalls geochemische Beprobungen, Dichtekarten tektonischer Elemente, topographische Karten, Radardaten, seismische Daten kombiniert werden, um eine Interpretation zu verbessern.

3. Erfahrungen bei den Untersuchungen an den DS

Bei der Arbeit mit den geologischen Daten zeigte sich die besondere Bedeutung einer eigenen Geländeaufnahme, die Grundlagen für die Einschätzung bereits vorhandener Informationen und Karten lieferte. So erlaubte die Profilkartierung eine differenzierte Strukturinterpretation, deren Ergebnisse besonders die Auswertung von DS - Kombinationen unterstützten. Die petrographische und

stratigraphische Bearbeitung machte deutlich, welche Schwierigkeiten bei einer Parallelisierung der VK - Serien auftreten. Die Untersuchungen zu Nebengesteins - Assoziationen und die Gedanken über die Bedingungen der Erzgenese liessen Ansätze entstehen, die eine geologische Detailaufnahme für die Detektion in flacher Teufe liegender Vererzungen optimierten. Auch die Einführung von Prioritätszonen erwies sich als vielversprechende Methode, um in kleinen Masstäben Hinweise auf vorhandene Erzfazies zu erhalten.

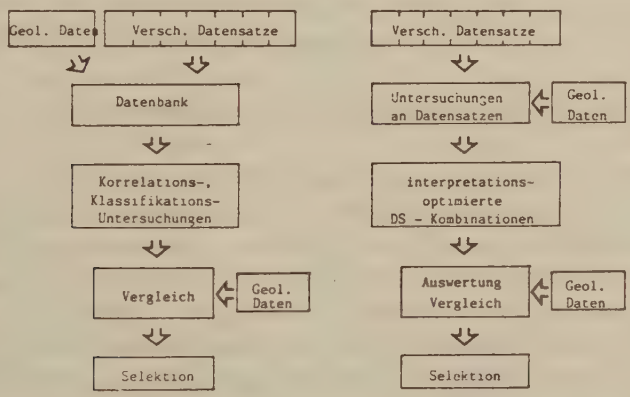
Eine Einbeziehung der geologischen Karteninformationen als digitalisierte Polygondarstellungen in DS - Kombinationen erschien aber wenig sinnvoll, sie sind durch ihren komplexen und z.T. `subjektiven' Informationsinhalt besser als Referenzdaten für die Interpretation der anderen DS geeignet. Eine Normierung als digitaler DS würde zuviel Detailinformation unterdrücken.

Die FE - Daten sind nur dann thematisch sinnvoll in der Exploration zu verwenden, wenn sie gezielte Aussagen über Eigenschaften der Erzfazies zulassen. So sind Klassifikationen und Korrelationsanalysen nur bedingt geeignet, ein spezifisches Phänomen gezielt zu verstärken und störende zu unterdrücken. Eine wichtiger Aspekt dagegen ist die Nutzung von FE - Daten als orientierende Grundlage und als Korrektiv anderer DS.
Geophysikalische Daten sind auch dann wertvoll, wenn sie keine direkten Hinweise auf die Erzfazies zulassen. Indirekte Informationen, auch wenn sie höhere Interpretationsfehler bedingen, bieten in einer Synopsis trotzdem eine beachtliche Sicherheit in einer thematischen Aussage. Auch empirische Beobachtungen an den Quellendaten sind ohne ausreichende theoretische Erklärung zu beachten. Komplexe Vorgaben bei Problemen der Exploration können auch komplexe Lösungsansätze erfordern.

4. Bedeutung von DS - Kombinationen

Bei der Selektion von Schwerpunktsgebieten und vielversprechender Anomalien versucht ein Explorationsgeologe im Allgemeinen verschiedene Informationsquellen simultan zu berücksichtigen. Dazu kann er versuchen, alle vorhandenen Daten pauschal auf die Korrelation anomaler Bereiche hin zu untersuchen und resultierende Anomaliekonzentrationen auf ihre thematische Bedeutung hin zu

prüfen. Er kann aber auch versuchen, so weit als möglich den thematischen Informationsgehalt einzelner DS zu klären und dann über eine Kombination die Auswertung zu unterstützen. Diesen beiden Möglichkeiten entsprechen zwei unterschiedliche Arbeitsansätze bei der Bewältigung mehrerer DS (Abb.73). Während DS - Kombinationen als Ergebnis von Klassifikationen und Korrelationsanalysen innerhalb einer Datenbank - Struktur die thematische Erfahrung des Bearbeiters nur schematisch bei der Auswertung zur Wirkung kommen lassen, ist dies bei der Interpretation von DS - Kombinationen des hier vorgestellten Typs besser möglich. Da, wie schon betont, gerade bei den komplexen und indirekten Zusammenhängen verschiedener DS eine flexible Einbeziehung geologischer Erfahrung eine wesentliche Rolle spielt, sind DS - Kombinationen als interpretationsoptimierte Darstellungen eine geeignete Unterstützung bei einer explorationsgeologischen Auswertung.



"automatische Verfahren" (IBM-CNES - Projekt 1983, BOLIVAR et al. 1983, TRAUTWEIN et al. 1982)

"Interpretationsoptimierung" (CONRADSEN&THYRSTEDT 1985, GUINNESS et al. 1983, eigene Untersuchungen)

Abb.73 Arbeitsansätze für eine integrierte, digitale gestützte Auswertung verschiedener DS in der Exploration

Verfügbare und potentiell interessante DS bieten prinzipiell eine beliebige Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten. Die informative Bedeutung interpretationsoptimierter Darstellungen mehrerer DS hängt dabei aber von einem fachlich gestützten Konzept ab, das wiederum die Freiheitsgrade der Kombinationsmöglichkeiten wesent-

lich einschränkt. Aus ihren Eigenschaften heraus nicht vergleichbare DS und technische Einschränkungen bei der Auswahl der Kombinationsverfahren beschränken schließlich die Wahlmöglichkeiten auf ein überschaubares Maß.

UNTER DATENSATZ-KOMBINATIONEN WERDEN KEINE AUTOMATISCHEN AUSWERTEVERFAHREN VERSTANDEN, SONDERN EIN INSTRUMENTARIUM, DESSEN NUTZUNG EINE VERBESSERTE UND EFFEKTIVERE AUSWERTUNG VERSCHIEDENER, THEMATISCH RELEVANTER DATENSÄTZE ERMÖGLICHT.

Bei der Arbeit mit und der Bewertung von kombinierten DS sollte man sich somit immer vergegenwärtigen:

DATENSATZ-KOMBINATIONEN KÖNNEN KEINE INFORMATIONEN LIEFERN, DIE IN DEN QUELLENDATEN NICHT SCHON VORHANDEN SIND. SIE KÖNNEN ABER THEMATISCH WICHTIGE ASPEKTE VERDEUTLICHEN UND FÜR EINE INTERPRETATION SICHTBAR MACHEN, ANDERE, STÖRENDE UNTERDRÜCKEN. DAHER MUß GEWÄHRLEISTET SEIN, DAß ALLE VERARBEITUNGSSCHRITTE VON DEN QUELLENDATEN BIS ZUR DATENSATZKOMBINATION UNTER DER KONTROLLE DES GEOLOGISCHEN BEARBEITERS (INTERPRETEN) VORGENOMMEN WERDEN.

Besonders wichtig ist die Eigenschaft, trotz einer Synopsis noch weitgehend den Informationsgehalt der Quellendaten visuell getrennt betrachten zu können. So können etwa Fehldeutungen geophysikalischer Anomalien durch korrektive Selektion mit FE- und anderen geophysikalischen Daten minimiert werden. Andererseits können aber auch schwache Anomalien, die bei einer Vorinterpretation und automatischen Erfassung unter einer Signifikanzschwelle liegen würden, in der unmittelbaren Zusammenschau mit anderen DS thematisch bedeutend werden. Die Trennbarkeit der Informationsebenen in den Kombinationen und die Möglichkeit zur halb-quantitativen Abschätzung der Intensität von Quellendaten erlaubt dem Interpreten eine differenzierte Diagnostik in einem Produkt. Korrelations- und Klassifikationsmodelle liefern häufig aus subtilen Daten - Eigenschaften durch pauschalierende Behandlung keine signifikanten Ergebnisse.
Geologische Karten sind als hochkomplexe und flächenhaft wenig homogene Datenquelle (verglichen mit FE und Geophysik) kaum für eine unmittelbare Integration geeignet. Ihr Wert liegt in der Referenz während der Auswertung von DS - Kombinationen.

INTERPRETATIONSOPTIMIERTE DATENSATZ-KOMBINATIONEN SOLLEN DURCH
EINE --- ORIENTIERENDE GRUNDLAGE
--- SYNOPTISCHE DARSTELLUNG
--- BEHERRSCHUNG GROßER DATENDICHTEN
--- ERLEICHTERUNG THEMATISCHER KORREKTUREN UND INFORMATIONSREDUKTION
GEGENÜBER QUELLENDATEN EINE STEIGERUNG DES INFORMATIONSWERTES EINZELNER DATENSÄTZE BEI GEOLOGISCHEN FRAGESTELLUNGEN BEWIRKEN.

Ein sorgfältiges Konzept, das mit den geologischen Bedingungen und den genetischen Vorstellungen über die Erzfazies in Einklang steht, und schließlich die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung sind wichtige Voraussetzungen bei der Realisierung erfolgversprechender DS - Kombinationen.

4.1. Eignung von DS für Kombinationen

Die Basis der verwendeten Kombinationsverfahren ist ein reguläres Raster bildhafter Daten, wie sie etwa mit Satellitenscannern erzeugt werden. Alle DS, die sich anisotrop bezüglich der flächigen Datendichte verhalten, verursachen Probleme bei einer Überführung in ein reguläres Raster. Interpolationsalgorithmen vermögen bis zu einem gewissen Grad Anisotropien ohne nennenswerte Informationsverluste auszugleichen. Aus der Erfahrung mit den in dieser Arbeit verwendeten Daten lassen Verhältnisse der Datendichte auf und senkrecht zu Messlinien von größer 5:1 bei den verwendeten Interpolationsverfahren bereits Inhomogenitäten im Grautonbild sichtbar werden (Fluglinieneffekte). Damit beeinflussen sie natürlich auch die Interpretation von DS - Kombinationen.

Bei der Digitalisierung von Isolinienkarten und ihrer Überführung in Rasterdaten ist die Abstufung der Isolinienwerte ein begrenzender Faktor. Ein weich interpoliertes Rasterbild einer Karte mit wenigen Abstufungen täuscht eine nicht vorhandene Genauigkeit der Quellendaten vor. Unübersichtliche Karten mit häufigen Minima/Maxima - Wechseln der Werte zeigen bei einer Digitalisierung oft flächige Strukturen bedeutend besser. Karten mit wenigen vom Hintergrund abweichenden Extremwerten gewinnen durch die Digitalisierung für die Interpretierbarkeit weniger. Für die

in dieser Arbeit verwendeten Darstellungsverfahren gelten als optimale Eigenschaften für DS:

Intensität	---	ein differenziertes Grautonmuster mit nur wenigen dunklen Flächen (um Farbfrequenz und Sättigung noch erkennen zu lassen)
Farbfrequenz	---	keine Bevorzugung
Sättigung	---	nur 2, höchstens 3 thematisch wichtige Wertestufen
Parallaxe	---	keine hochfrequenten Daten mit vielen, rasch wechselnden Intensitäten (optimal für geophysikalische Daten)
Addition	---	nur deutlich unterschiedliche Frequenzen mit geringen Amplitudenschwankungen der DS

Hochauflösende FE - Daten sind ein entscheidendes Element in interpretationsoptimierten DS - Kombinationen, sie bieten:

* eine orientierende Grundlage
* aktuelle Oberflächeninformation
* Korrekturmöglichkeiten für andere DS
* spezifische thematische Informationen

Für sich gesehen sind sie kein Wundermittel in der Exploration, liefern also keine Informationen, die ohne kritische Betrachtung und Selektion nutzbar sind.

FE DATEN SIND ABER EIN WICHTIGES WERKZEUG, DAS ABHÄNGIG VON EINSATZGEBIET UND EXPLORATIONSZIEL ZUSÄTZLICHE HINWEISE LIEFERN UND DIE AUSWERTUNG ANDERER GEOWISSENSCHAFTLICHER DATEN WESENTLICH UNTERSTÜTZEN KANN. BEI INTERPRETATIONSOPTIMIERTEN DARSTELLUNGEN SIND SIE EINE UNVERZICHTBARE GRUNDLAGE.
Die Verwendung geophysikalischer, geochemischer und anderer Informationsquellen sollte sich dagegen stark am entsprechenden Explorationsziel orientieren.

4.2. Eignung von Kombinationsverfahren

Verfahren zur Integration zweier und mehrerer DS, die eine Quelleninformation nicht mehr erkennen lassen, sind keine optimale Interpretationsgrundlage. So werden etwa bei Ratio- und Hauptachsentransformationen nur Korrelationen zwischen DS beachtet, nicht aber das ebenfalls wichtige Quellensignal eines DS.

FÜR EINE INTERPRETATIONSOPTIMIERTE DATENSATZ-KOMBINATION SOLLTEN VERFAHREN BENUTZT WERDEN, DIE DEN QUELLEN-INFORMATIONSGEHALT JEDES EINZELNEN DATENSATZES TRENNBAR DARSTELLEN, ABER GLEICHZEITIG AUCH EINE SYNOPSIS DER VERSCHIEDENEN DATENSÄTZE ERLAUBEN.
So findet keine wesentliche Vorfilterung und Vorinterpretation statt, die wichtige Beiinformationen schon vor der thematischen Interpretation und einer Selektionsentscheidung unterdrücken würde.

Alle in dieser Arbeit verwendeten Verfahren sind für die Kombination zweier DS geeignet (ADD, SST, IHS). Dabei gelten die unter IV/1.3.2. gemachten Einschränkungen. Die Sättigungskomponente des IHS sollte wenn möglich dabei durch denselben DS wie die Farbfrequenz kontrolliert oder konstant gehalten werden.
Für drei DS gilt als universellste Möglichkeit eine Kombination mit IHS/SST, wobei wiederum die Sättigung als eigenständiger Informationsträger entfallt. Dieses Produkt bewährte sich gerade bei der Integration geophysikalischer mit FE - Daten. Eine IHS - Darstellung mit drei unabhängigen DS muß die Einschränkungen für die Sättigungskomponente berücksichtigen.
Die Integration von mehr als drei DS ist meiner Ansicht nach wenig sinnvoll, Versuche am interaktiven Bildverarbeitungsplatz zeigten beträchtliche Schwierigkeiten in der Trennbarkeit der DS bei den verwendeten drei Kombinationsverfahren.

4.3. Generelle Einsatzmöglichkeiten und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Einsatzmöglichkeiten für die ersten Phasen eines größeren Explorationsprogramms untersucht. Gerade am Beginn einer systematischen Aufsuchung größerer Erzkonzentrationen, bei der Übersichtsexploration, sind geeignete DS - Kombinationen ein wesentliches Mittel um große, flächendeckende Datenmengen zu beherrschen und in eine interpretationsoptimierte Form zu bringen. Daten geophysikalischer Befliegungen, regionale geochemische Aufnahmen, FE - Daten, aber auch spezifische geologische Informationen sind fur Zwecke der Selektion von Detailgebieten ohne wesentliche Informationsverluste schneller und übersichtlicher zu bearbeiten. In der Detailexploration zur Untersuchung begrenzter Areale auf Erzlager empfehlen sich DS - Kombi-

nationen nur bei hohen Datenmengen der eingesetzten geophysikalischen und geochemischen Bodenverfahren. Geringere Datendichten können ohne wesentliche Informationsverluste nach herkömmlichen Auswertemethoden, etwa der Bearbeitung verschiedener Kartendarstellungen behandelt werden

WO ALSO UNTERSUCHUNGSMETHODEN KEINEN EINDEUTIGEN NACHWEIS GESUCHTER PHÄNOMENE ERLAUBEN UND VERSCHIEDENE DATENSÄTZE MIT MEHRDEUTIGEN HINWEISEN VORLIEGEN; DIESE EIN GROßES, UNÜBERSICHTLICHES DATENVOLUMEN REPRÄSENTIEREN, KÖNNEN GEEIGNETE DATENSATZ-KOMBINATIONEN DEN BEARBEITER IN SEINEN ENTSCHEIDUNGEN WIRKUNGSVOLL UNTERSTÜTZEN.

Diese Definition zeigt, daß nicht nur die Exploration auf mineralische Rohstoffe von dieser Methodik profitieren kann, Fragestellungen in der Hydrogeologie, einer geologischen Landesaufnahme, der Bodenkunde verlangen häufig ähnlich umfangreiche Lösungsansätze. Probleme der flächenmäßigen Erfassung komplexer Daten treten auch in der Geographie, Landnutzung, Stadt- und Regionalplanung, Land- und Forstwirtschaft und beim Umweltschutz auf. Dabei spielen ebenfalls FE - Daten als fundamentales Informationsmedium eine tragende Rolle.

In der näheren Zukunft wird die Anzahl verfügbarer Messverfahren für alle Einsatzfelder weiterhin wachsen, die `Informations- und Datenflut' größer werden, mit ihrem Volumen wird auch das Interesse an Auswerteverfahren für komplexe Fragestellungen wachsen. Bis jetzt ist noch nicht abzusehen, ob automatische Verfahren den hohen fachlichen Anforderungen in der Auswertung gerecht werden können. Interpretationsoptimierte DS - Kombinationen sind deshalb für solche Fragestellungen eine ernsthaft zu diskutierende Alternative.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADD	Addition verschiedenfrequenter Bilddaten
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BV	(digitale) Bildverarbeitung
Ca.Tharsis S.A.	Compania de Azufre y Cobre de Tharsis S.A.
CCD	Calcium Compensation Depth
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CNES	Centre Nationale des Etudes Spatiale
DIGHEM	Digital Helicopter Electromagnetics
DS	Datensätze
EM	Elektromagnetik (Verfahren)
ESA	European Space Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute Inc.
ESRIN	European Space Research Institute
FE	Fernerkundung
GAMMA	Gamma - Spektrometrie
GIS	Geographisches Informations System
GRAV	Gravimetrie (Verfahren)
HCMM	Heat Capacity Mapping Mission
IBM	International Bussiness Machines Corp.
ID	Identity, Identität(-snummer)
IGME	Instituto Geologico y Minero de Espagna
IGN	Instituto Geografico Nacional
IHS	Intensity, Hue, Saturation
IR	Infrarot
ITC	International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences
LB	Luftbild
Lin	Lineament(e)
LMU	Ludwigs Maximilians Universität
LpR	Lineamente per Rasterzelle
MAG	Magnetik (Verfahren)
MSS	Multi Spectral Scanner
mw	microwaves (Mikrowellen)
nir	near infrared (nahes Infrarot)
PCA	Principal Component Analysis
PC	Principal Component
PDP	Programmable Data Processor
Pixel	Picture Element
RGB	Rot, Grün, Blau (-System)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SST	Synthetisches Stereo (Parallaxenbilder)
s/w-	schwarzweiss-
swir	short wave infrared (kurzwelliges Infrarot)
TG	Tonschiefer-Grauwacken Komplex
tir	thermal infrared (thermales Infrarot)
TM	Thematic Mapper
TMS	Thematic Mapper Simulator
TQ	Tonschiefer-Quarzit Komplex
VK	Vulkanosedimentärer Komplex
vis	visible (sichtbares Licht)

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

ABBILDUNGEN:

Abb.1 Filon Norte, Tharsis...(nicht beim Druck berücksichtigt)
Abb.2 Arbeitsablaufplan.....
Abb.3 Lage des Testgebiets und Geologie.....
Abb.4 Standardprofile.....
Abb.5 Geologische Karte.....
Abb.6 TQ-Tonschiefer.....
Abb.7 Quarzit Schliff.....
Abb.8 Alkali/SiO_2 Diagramm der Magmatite.....
Abb.9 meta-Rhyolith Schliff.....
Abb.10 meta-Dazit Tuff Schliff.....
Abb.11 Pillows.....
Abb.12 meta-Basalt Schliff.....
Abb.13 rhyolitische Brekzie Schliff.....
Abb.14 Manganschiefer Schliff.....
Abb.15 Sandstein Schliff.....
Abb.16 Sedimentationsraum.....
Abb.17 Metamorphose+Subfazies Zonierung.....
Abb.18 TM4+Struktur/Texturinterpretation.....
Abb.19 Schieferung Schichtung.....
Abb.20 perspektivische Profile.....
Abb.21 Detailauswertung Strukturen Testgebiet.....
Abb.22 Lineamentauswertung Testgebiet.....
Abb.23 Lineamentanalyse Testgebiet.....
Abb.24 Geologie+Kleintektonik Filon Norte.....
Abb.25 ac-Trennflächen Filon Norte.....
Abb.26 sedimentäre Strukturen im Erz.....
Abb.27 ss-Flächen und fundamentales Kluftsystem.....
Abb.28 Nebengestein Sierra Bullones.....
Abb.29 Nebengestein der Erzlager.....
Abb.30 Hydrothermales System.....
Abb.31 FE-Sensorik.....
Abb.32 MSS- und TM-Kanäle.....
Abb.33 Doppelratio Histogramm.....
Abb.34 MSS Doppelratio.....
Abb.35 Abspielungen TM-Kanäle.....
Abb.36 Strukturverstärkungen TM.....
Abb.37 Ratio 3/4 TM.....
Abb.38 Hauptachsen 3,4,5,7 TM.....
Abb.39 Gesteine+spektrales Verhalten.....
Abb.40 TM Doppelratio.....
Abb.41 Lineamentdichtekarte.....
Abb.42 Explorationsmethoden.....
Abb.43 Messdatenbegrenzung.....
Abb.44 EM-Daten Almagrera.....
Abb.45 magnetisches Profil.....
Abb.46 Th-Spektrometrie+Geologie.....
Abb.47 Gravimetrie Almagrera.....
Abb.48 Rasterkarte Th-Spektrometrie.....
Abb.49 MSS/HCMM Synthetisches Stereo.....
Abb.50 Addition von DS.....
Abb.51 IHS im RGB-System.....
Abb.52 Pixel Transformation RGB/IHS.....
Abb.53 3 DS als RGB und IHS.....
Abb.54 Lin-karte/Lin-dichte/Rasterbild.....
Abb.55 Verarbeitung der DS.....
Abb.56 Karte der Wahrscheinlichkeitszonen.....
Abb.57 geol. Detailkarte Tierras de Pedro.....
Abb.58 geol. Detailkarte Almagrera.....
Abb.59 geol. Detailkarte Cantareras.....

Abb.60 geol. Detailkarte Rica.....
Abb.61 geol. Detailkarte Romanera.....
Abb.62 Interpretation 1 .....
Abb.63 Interpretation 2 .....
Abb.64 Interpretation 3 .....
Abb.65 Interpretation 4 .....
Abb.66 Interpretation 5 .....
Abb.67 Interpretation 6 .....
Abb.68 Interpretation 7 .....
Abb.69 Interpretation Zusammenfassung.....
Abb.70 Vorschlag Detailgebiete.....
Abb.71 Ablauf eines Explorationsprogramms.....
Abb.72 Plan für die Übersichtsexploration.....
Abb.73 Arbeitsansätze bei der Datenintegration.....

TABELLEN:

Tab.1 verwendete DS.....
Tab.2 Kiesproduktion.....
Tab.3 Erzminerale, Elemente.....
Tab.4 spez. scheinb. Widerstände der Serien.....
Tab.5 Magnetik der Serien.....
Tab.6 Gamma-Kanäle.....
Tab.7 Radioelementkonzentrationen in Gesteinen.....
Tab.8 Dichten der Gesteine.....
Tab.9 Differenzierungseigenschaften der DS.....
Tab.10 Eigenschaften der Kombinationsmethoden.....
Tab.11 Eigenschaften der DS zur Darstellung.....
Tab.12 Abstandswerte für Wahrscheinlichkeitszonen.....
Tab.13 Erzfazies und Wahrscheinlichkeitsklassen.....
Tab.14 Übersichts/Detailexploration.....

ANHANG:

Anhang 1 geologische Profile.....
Anhang 2 radiometrische Dynamik der TM-Daten.....
Anhang 3 Korrelation TM/Geologie.....
Anhang 4 Geophysikalische Karten BGR/Ca.Tharsis S.A.....
Anhang 5 Prozessierung der geophys. Daten.....
Anhang 6 K/Th-Ratio.....
Anhang 7 Parameter Berechnung DS-Kombinationen.....
Anhang 8 "Technische" Beurteilung der DS-Kombinationen...

VERWENDETE LITERATUR ZU DIESER ARBEIT

ABRAMS M.,ASHLEY R., ROWAN L.,GOETZ A., KAHLE A. (1977)	mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 um, Geology, vol.5, S. 713-718
ABRAMS M.,BROWN D., LEPLEY L.,SADOWSKI R., (1983)	remote sensing for porphyry copper depopsits in southern Arizona, econ. geology, vol.78, S.591-604
ABRAMS M.,KAHLE A., GILLESPIE A.,CONEL J. (1985)	geologic utility of Landsat 4 TM data proc.LS.4 science char. early results symp., NASA, Greenbelt, S.127-131
BÄCKER H.& RICHTER H. (1973)	Die rezente hydrothermal-sedimentäre Lagerstätte Atlantis II Tief im Roten Meer, Geol.Rdschau 62 III, S.697-741
BANNINGER C.J. (1981)	remote sensing of heavy metal stressed vegetation in the visible and near-IR, unveröff. MSc-thesis ITC, Enschede, 352 S.
BATSON R.M.,EDWARDS K., ELIASON E.M. (1976)	synthetic stereographic and Landsat pictures, photogr.eng.and RS, vol.42, no.10, S. 1279-1284
BERNARD A.J.&SOLER E. (1974)	apercu sur la province pyriteuse Sud-iberique, Cent.Soc.Geol.Belg.Gisements Stratiformes et Provinces Cupriferes, Liege S. 68-83
BILLMEYER F.W.& SALTZMAN M. (1966)	principles of color technology, Wiley, New York, 181 S
BISCHOFF J.L.&DICKSON F.W. (1975)	seawater-basalt interactions at 200 C and 500 bars: implications for an origin of sea-floor heavy metal deposits and regulations of seawater chemistry, Earth &Plan.Sci.Lett., vol.25(3), S. 385-397
BOCK H. (1980)	Das fundamentale Kluftsystem, Z.dtsch. Geol.Ges. 50, Hannover, S. 627-650
BODECHTEL J.& KRITIKOS G. (1971)	quantitative image enhancement of photographic and non-photographic data for earth resources, ERIM, Ann Arbor Michigan S. 469-485
BOLDY J. in: HOOD P.J. ed. (1977)	exploration discoveries Noranda District, in: geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, proc. of explor., Ottawa, S.593-605
BOLIVAR S.L.,FREEMAN S.B.,WEAVER T.A. (1983)	evaluation of integrated data sets - four examples, computers&geosciences,
BOLVIKEN B.,HONEY F., LEVINE S.R.,LYON R.J.P., PRELAT A. (1977)	detection of naturally heavy-metal-poisoned areas by Landsat 1 digital data, journ. geochem. explor., vol8, S.457-471

BOOGAARD M. v.d. (1967) geology of the Pomarao region (S. Portugal), Thesis Univ. Amsterdam, 113 S

BOSUM W. (1981) Anlage und Interpretation aeromagnetischer Vermessungen im Rahmen der Erzprospektion, Geol. Jhrb. Reihe E, Heft 20, 65 S.

BOTHOREL A.,CERVELLE B., CHOROWICZ J.,TAMAIN G., ALEM E.M. (1984) spectral signatures (vis/nir) of rocks and ores; application to RS of three types of orebodies from S-Morocco, mod. geology, vol.8, S.277-294

BROOKS R.R. (1972) geobotany and biochemistry in mineral exploration, Harper&Row, New York, 390 S

CABALLERO E.L., MADEL J. BONANOS A.S. (1975) cartografia geologico 1:10000 del flanco norte del anticlinal de Puebla de Guzman Prov. de Huelva, Bericht IGME I/958-1, Huelva, 35 S

COLWELL R.N. ed. (1983) manual of remote sensing, 2 vol., Sheridan Press, Falls Church Va., 2440 S.

CONRADSEN K.& THYRSTEDT T. (1985) analysis of satellite imagery combined with geophysical and geochemical measurements, the use of RS in mapping of oxidation zones and lineaments in Greenland, pres.workshop on RS in min.explor. (unpubl.), EC, Brüssel, 24 S.

COOPE J.A.& DAVIDSON M.J. in: HOOD P.J. ed. (1977) some aspects of integrated exploration, in: geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, proc. of explor., Ottawa, S.575-593

COX K.G., BELL J.D., PANKHURST R.J. (1979) the interpretation of igneous rocks, Allen&Unwin, London, 450 S

CURRAN P.J. (1985) principles of remote sensing, Longman, London, 282 S.

DEGENS E.T.& ROSS D.A. ed. (1969) hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea, Springer, New York

DOETSCH J. (1957) Esbozo geoquimico y mineralogenetico del criadero de pyritas "Las Herrerias" Puebla de Guzman (Huelva), Bol.Inst. Geol.Min.Esp. 68, Madrid, S.225-306

EDMOND J.M.,DAMM K.v., McDUFF R.E.,MEASURES C.I. (1982) chemistry of hot springs on the east Pacific Rise and their effluent dispersal Nature, vol.297(5863), S.187-191

EDMOND J.M.&DAMM K.v. (1983) Heiße Quellen am Grund der Ozeane, in Ozeane und Kontinente, Verl.Spektr.Wiss., S.216-230

ELVIDGE C.D.& LYON R.J.L. (1985) estimation of the vegetation contribution to the 1.65/2.22 um ratio in airborne TM imagery of the Virginia Range, Nevada, Int. J. Rem. Sens., vol.6, no.1, S.75-88

EZQUERRA del BAYO (1832) Bemerkungen über den Bergbau der Mauren zu Rio Tinto, Karst.Arch.Min. 4

Fa.ESRI (1982) Dokumentation zu GIS - Komponenten PIOS, GRID und GRID-TOPO (restr. circul.), 11 th. ed.

Fa.FELDLE (1984) Kurzdokumentation zu DIMAIN im System IFE-GEOPLAN (restr. circul.)

Fa.INTERNATIONAL SOFTWARE CONTRACTORS A.B. (1982) Dokumentation zu GEOPAK unter UNIRAS (restr. circul.) 1st. ed.

FERNANDEZ ALONSO F. (1963) investigacion geoelectrica de piritas en el area "Lancha" de la zona minera de Huelva, min. y metall., Madrid, S. 1-8

FERNANDEZ ALVAREZ G. (1975) los yacimientos de sulfuros polimetallicos del S.O.iberico y sus metodos de prospeccion, tesis doct. univ. Salamanca, Salamanca, 102 S

FORTESCUE J. (1965) exploration architecture, Geol. Surv. Can., Paper 65-6, 4-8

FRANCHETEAU J.,NEEDHAM H.D.,COUKROUNE P. et al. (1979) massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the east Pacific Rise, Nature, vol.277(5697), S. 523-528

FRASER D.C. (1975) the DIGHEM interpretation manual, restricted circulation (unpubl.), DIGHEM Ltd, Toronto

FRASER D.C. (1979) the multicoil II airborne electromagnetic system, geophysics, vol.44, S.1367-1394

FRISCHKNECHT F.C. (1967) fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth, Colorado School of Mines, vol.62, no.1, 326 S.

GILLESPIE A.R. in: SIEGAL B.S.& GILLESPIE A.R. (1980) digital techniques of image enhancement, in: remote sensing in geology, Wiley, New York, 702 S

GRASTY R.L. in: HOOD P.J. ed. (1977) gamma ray spectrometric methods in uranium exploration and operational procedures, in: geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, proc. of explor., Ottawa, S.147-162

GOCHT W. (1983) Wirtschaftsgeologie und Rohstoffpolitik Springer, Berlin, 295 S

GOLD D.P. in: SIEGAL B.S.& GILLESPIE A.R. ed. (1980) structural geology in: remote sensing in geology, Wiley&sons, New York, 702 S

GOETZ A.F.H.& ROWAN L.C. (1981) geologic remote sensing, science, vol.211, S.781-791

GOETZ A.F.H.,ROCK B.N., ROWAN L.C. (1983) remote sensing for exploration: an overview, econ. geol., vol.78, S.573-590

GUINNESS E.A.,ARVIDSON R.E.,LEFF C.E.,EDWARDS H.H.,BINDSCHADLER D.L. (1983) digital image processing applied to analysis of geophysical and geochemical data for Southern Missouri, econ. geol., vol.78, S.654-663

HAYDN R. (1971) Weiterentwicklung eines Computerprogramms zur tektonischen Datenverarbeitung, Teil einer unveröffentl. Dipl.arbeit, Univ. München

HAYDN R.& BODECHTEL J. (1975) Eine Möglichkeit der anwendungsbezogenen Reduktion multispektraler Daten am Beispiel von ERTS-1, Raumfahrtforschung, Heft 1, S.7-11

HAYDN R.,DALKE G., HENKEL J., KAUFMANN H. (1982/1) multidisciplinary investigations on HCMM data over middle Europe and Morocco, BMFT Forsch.Ber.HCM-053, München, 82 S.

HAYDN R.,DALKE G., HENKEL J., BARE E.J. (1982/2) application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement, ERIM proc. int. symp. on RS of arid lands, Cairo, S.599-616

HAYDN R. (1985) a concept for the processing and display of TM data, proc. LS 4 science char. early res. symp., NASA, Greenbelt, S.217-237

HEKINIAN R. (1982) petrology of the ocean floor, Elsevier Sci. Publ. Comp., 216 S

HENKEL J. (1982) usage of a desktop computer system for geophotogrammetric interpretation of image data, IGARSS (IEEE) Vol.1, München, WP 5-4, 3 S

HÖLLINGER R. (1958) Beitrag zur Kenntnis der Geologie im SW der Provinz Huelva, Diss. Univ. Münster

HOFSTETTER J.P., LECOLLE M., STOPPEL D. (1979) decouverte et datation d'une faune de Viseen inf. dans les calcaires du SE d'Aznalcollar - Seville, Acad.Sci. ser.D Vol. 288, Paris, S.855-858

HOOD P.J.,HOLROYD M.T., McGRATH P.H. in: HOOD P.J. ed. (1977) magnetic method applied to base metal exploration, in: geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, proc. of explor., Ottawa, S.77-104

HUNT G.R.,SALISBURY J.W. LENHOFF C.J. (1970-76) visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I-VI minerals, VII-XII rocks, mod. geol., vol.1-5, ges.136 S.

HUTCHINSON R.W. (1965) genesis of Canadian massive sulfides reconsidered by comparison to Cyprus deposits, Min.&Met. Bull. vol.56, S.972-986

HUTCHINSON R.W. (1973) volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance, econ.geol 68/8, S. 1223-1246

IBM-CNES (1983) geological and RS - data base, proiect plan (unpubl.), IBM Research Centre, Paris, 9 S

IGME (1976) investigacion geoquimica en las hojas 936, 939, 958, 961, Instituto Geologico y Minero de Espana, serv.de publ., Madrid, 12 S.

IGME (1982) comentares por la mapa geologico de espana 1:50000, hoja 936,958,959, minist. de ind.y energ., Madrid

JASKOLLA F. (1978) Geologisch-tektonische Untersuchungen an Satellitenbildlineamenten in den N-Kalkalpen, Diss. Univ. München, 118 S

KERSABIEC A.M. de, in: AHRENS L.H. ed. (1979) elements en traces dans les pyrites de la province de Huelva, in: origin and distribution of the elements, Pergamon, New York, S. 673-682

KERSABIEC A.M. de, ROGER G. (1976) sur la distribution de quelques elements en traces dans l'encaissant des amas pyriteux de la partie centrale de la province de Huelva, Bur.Rech.Geol.Min. Bull. ser.2 sec.2, S.439-488

KILLEEN P.G. in: HOOD P.J. ed. (1977) gamma ray spectrometric methods in uranium exploration - application and interpretation, in: geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, proc. of explor., Ottawa, S.163-231

KLOCKMANN F. (1894) Über die lagerartige Natur der Kiesvorkommen des südlichen Spaniens und Portugals, Sond.Ber.preuß.Akad.Wiss. 46, Berlin, S.1173-1181

KOOPMANS B.N., PACHECO C.A., WOLDAI T., PAYAS A. (1984) application of multiband synthetic aperture radar imagery and colour IR imagery in exploration of mineralized areas in the Pyrite Belt - Prov. Huelva unpubl.rep.EC, 61 S

KRONBERG P. (1984) Photogeologie, Enke, Stuttgart, 268 S

KUNTZE H.,NIEMANN J. ROESCHMANN G.,SCHWERDTFEGER G. (1981) Bodenkunde, UTB 1106, Ulmer Verlag, Stuttgart, 407 S

LABOVITZ M.L.,MASUOKA E.J.,SIEGRIST A.W.,BELL R.,NELSON R.F. (1983) the application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides - results from the 1980 field season at Mineral, Virginia, econ. geol., vol.78, S.750-760

LAG J.& BOLVIKEN B. (1974) some naturally heavy-metal poisoned areas of interest in prospecting, soil chemistry and geomedicine, Norges geologiskl undersokelse, vol.304, S.73-96

LATHRAM E.H.& GRYC G. (1973) metallogenic significance of Alaskan geostructures seen from space, ERIM proc., Ann Arbor Michigan, S.1209-1211

LOTZE F. (1945) Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta, Geotekt.Forschg. 6, Berlin, S. 78-92

LUSK J. (1972) examination of volcanic exhalative and biogenic origins for sulfur in the stratiform massive sulfide deposits of New Brunswick, Econ.Geol., vol.67

LYON R.J.P.,ELVIDGE C. MOUAT D. (1982) very high altitude TMS-type scanner coverages of three mineralized zones - Silver Bell, Kalamazoo(Az), Pine Nuts(Nv) ERIM, RS for exploration geology, Fort Worth, vol.2, S.987-993

MEYLAN M.A. in: WOLF P. (1981) handbook of stratabound and stratiform ore deposits, Vol. 9, Elsevier, 771 S

O'CALLAGHAN J.F.& O'SULLIVAN K.N. (1982) imagebased GIS for mineral exploration: the Broken Hill Project, proc.int.symp. on Rs of environm., vol.1, Fort Worth, S.133-137

OFFIELD T.W., ABBOTT E. A., GILLESPIE A.R., LOGUERCIOS S.O. (1977) structure mapping on enhanced Landsat images of southern Brazil: tectonic control of mineralization and speculations on metallogeny; Geophysics, vol.42(3), S. 482-500

O'LEARY D.W., FRIEDMAN J.D., POHN H.A. (1976) lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms, geol.soc. America bull. 87, S. 1463-1469

PARASNIS D.S. (1972) principles of applied geophysics, Chapman &Hall, London, 214 S

PETERS W.C. (1978) exploration and mining geology, Wiley, New York, 696 S

PETRASCHECK W.E.& POHL W. (1982) Lagerstättenlehre, Schweizerbarth, Stuttgart, 341 S

PINEDO VARA I. (1963) piritas de Huelva - su historia, mineria y aprovechamiento, edit.summa, Madrid, 1003 S

PODWYSOCKI M.H.,GUNTHER F.J.,BLODGET H.W. (1977) discrimination of rocks and soil types by digital analysis of Landsat data, NASA Preprint X923-77-17

RAINES G.L.,CANNEY F.C. in: SIEGAL B.S.& GILLESPIE A.R. ed.(1980) vegetation and geology, in: remote sensing in geology, Wiley&sons, New York, 702 S

RAINES G.L.& GABELL A.R. (1982) spectral reflectance properties of pseudo-gossan and massive sulfide-gossan, ERIM, RS for explor. geol., Fort Worth, vol.1, S.25-27

RAMBAUD P.F. (1969) el sinclinal carbonifero de Rio Tinto y sus mineralizaciones asociadas, Bol. Geol.y Min. 71, Madrid, 229 S

RICKARD D.T. (1973) limiting conditions for synsedimentary sulfide ore formations, econ.geol. 68/5, S.605-617

RICKMAN D.L.& SADOWSKI R.M. (1982) application of TM-type data over a porphyry molybdenum deposit in Colorado, ERIM, RS for explor. geol., Fort Worth, vol.2, S.925-935

ROWAN L.C. (1975) application of satellites to geological exploration, Am.Sci., vol.63(4), S. 393-403

ROWAN L.C.,GOETZ A.F.H., ASHLEY R.P. (1977) discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images, Geophysics, vol.42(3), S.522-535

ROWAN L.C.& LATHRAM E.H. in: SIEGAL B.S.& GILLESPIE A.R. ed.(1980) mineral exploration im remote sensing in geology, Wiley&sons, New York, 702 S.

SABINS F.F. (1978) remote sensing - principles and interpretation, San Francisco, 426 S.

SALPETEUR I. (1976) etude structurale et petrographique de la zone de Paymogo - metallogenese des amas sulfures associes, these doct.ing. univ. de Nancy, 234 S

SAMES C.-W. (1974) Die Zukunft der Metalle, Suhrkamp TB 157, Frankfurt, 281 S

SCHERMERHORN L.J.G. (1970) mafic geosynclinal volcanism in the lower carboniferous of S Portugal, geol.en mijnbouw 49/6, S. 439-450

SCHERMERHORN L.J.G. (1971/1) an outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt, bol.geol.y min. 82,83,84, S. 23-50

SCHERMERHORN L.J.G. (1971/2) pyritite emplacement by gravity flow, bol.geol.y min. 82,83,84, S. 88-92

SCHERMERHORN L.J.G. (1975/1) spilites, regional metamorphism and subduction in the Iberian Pyrite Belt: some comments, geol.en mijnbouw 54/1, S.23-35

SCHERMERHORN L.J.G. (1975/2) pumpellyite-facies metamorphism in the Spanish Pyrite Belt, petrologie 1/1, S. 71-86

SCHMIDT R.G.& BERNSTEIN R. (1975) evaluation of improved digital processing techniques of Landsat data for sulfide mineral prospecting, US Geol.Surv.Open File Rep. no.75-632, 29 S

SCHROEDER D. (1978) Bodenkunde in Stichworten, Hirt Verlag Kiel, 154 S

SCHUETZ W. (1985) (Auslief.Ende '85) Magmatismus und Metallogenese im zentralen Teil des SW-iberischen Pyritgürtels, Provinz Huelva, Spanien, Express Edition, Berlin, 200 S.

SCHWALLER M.R.& TKACK S.J. (1980) premature leaf senescence as an indicator in geobotanical prospecting with remote sensing techniques, Proc.Int.Symp.RS of Envir.14th., San Jose, S.347-358

SEGAL D.B. (1983) use of Landsat multispectral scanner data for the definition of limonitic exposures in heavily vegetated areas, econ. geol., vol.78, S.711-722

SENGPIEL K.P. (1980) Kurzbericht über das Forschungsvorhaben NTS 6 des BMFT: "Ausrüstung und Erprobung eines Hubschraubers für geophysikalische Messungen" (unveröff. Ber.), BGR, Hannover, 35 S

SENGPIEL K.P. (1983) resistivity/depth mapping with airborne electromagnetic survey data, geophysics, vol.48, S.181-196

SHORT N.M. (1985) assessment of computer-based geological mapping of rock units in the Landsat 4 scene of northern death valley, Cal., proc. LS4 science char. early res. symp., NASA, Greenbelt, S.163-217

SIEGAL B.S.& GILLESPIE A.R. ed. (1980) remote sensing in geology, Wiley, New York, 701 S

SMITH W.L. (1977) remote sensing for mineral exploration Hutchinson&Ross, New York, 321 S

STELZNER&BERGEAT (1904) Die Erzlagerstätten (Die Kieslager von S-Spanien und S-Portugal), Leipzig, S. 347-355

STRAUSS G.K. (1965) Zur Geologie der SW-iberischen Kiesprovinz und ihrer Lagerstätten, mit besonderer Berücksichtigung der Pyritgrube Lousal/Portugal, Diss. Univ. München, 150 S.

STRAUSS G.K.& MADEL J. (1974) geology of massive sulphide deposits in the spanish-portuguese pyrite belt, Geol. Rdschau 63, S.191-211

STRAUSS G.K., MADEL J., FERNANDEZ ALONSO F. in: KLEMM D.D.& SCHNEIDER ed. (1977) exploration practice for stratabound volcanogenic sulphide deposits in the spanish-portuguese pyrite belt: geology, geophysics and geochemistry, in: Time- and Stratabound Ore Deposits, Springer, Berlin, S. 55-93

STRAUSS G.K., ROGER G., LECOLLE M., LOPERA E. (1981) geochemical and geological study of the volcano-sedimentary sulfide orebody of La Zarza - Huelva Spain, econ.geol. 76/7, S. 1975-2000

STRECKEISEN A.L. (1976) to each plutonic rock its proper name, earth sci. rev. 12, Elsevier, Amsterdam, S. 1-33

TELFORD W.M.,GELDART L. P.,SHERIFF R.E.,KEYS D.A. (1976) applied geophysics, Campridge University Press, Cambridge, 860 S

TRAUTWEIN C.M.,GREENLEE D.D.,ORR D.G. (1982) digital data base application to porphyry copper mineralization in Alaska-case study summary, USGS-EROS, open file report 82-801, 14 S

VILJOEN R.P.,VILJOEN M.J.,GROOTENBOER J., LONGSHAW T.G. (1975) ERTS-1 imagery: an appraisal of applications in geology and mineral exploration, Min.Sci.Eng., vol.7(2), S. 132-168

VOLK P. (1982) Möglichkeiten zur Erweiterung tektonischer Modelle — unveröffentl. Diplarbeit 2.Teil, Univ. München, 43 S

WATANABE T. (1970) volcanism and ore genesis, Econ.Geol., vol.65, S. 424-443

WEBER-DIEFENBACH K. (1976) Geochemische Untersuchungen an Erzschlämmen des Atlantis II Tiefs (Rotes Meer), Habilschrift Univ. München, 152 S

WEBB J.S. (1958) observations on the geology and origin of the San Domingos pyrite deposit, Portugal, Com.Serv.Geol.Port.42,Lissabon, S.129-143

WESCOTT T.& GABELMAN J. (1983) specific feature extraction from TM-data Lisbon valley, Utah, proc.int.geoscience and RS symp., IGARSS, S.Fransisco, vol.1, TA-4,8

WILLIAMS D. (1934) the geology of the Rio Tinto mines, Spain Trans.Inst.Min.Met., 43, S. 593-640

WILLIAMS D. (1962) Further reflections on the origin of the porphyries and ores of Rio Tinto (Spain), Trans.Inst.Min.Met. , 71, S.265-266

WILLIAMS D., STANTON R.L., RAMBAUD F. (1975) the Planes - San Antonio pyritic deposit of Rio Tinto, Spain: its nature, environment and genesis, inst.min.and met. Vol. 84, S. B73-B82

WUNDERLICH H.G. (1966) Wesen und Ursachen der Gebirgsbildung, BI-Verlag, Mannheim, 367 S

ZGF (1978) Die Zentralstelle für Geo-photogrammetrie und Fernerkundung in München, komm.geowiss. gem.forsch., mitt.VII, Bonn, 59 S

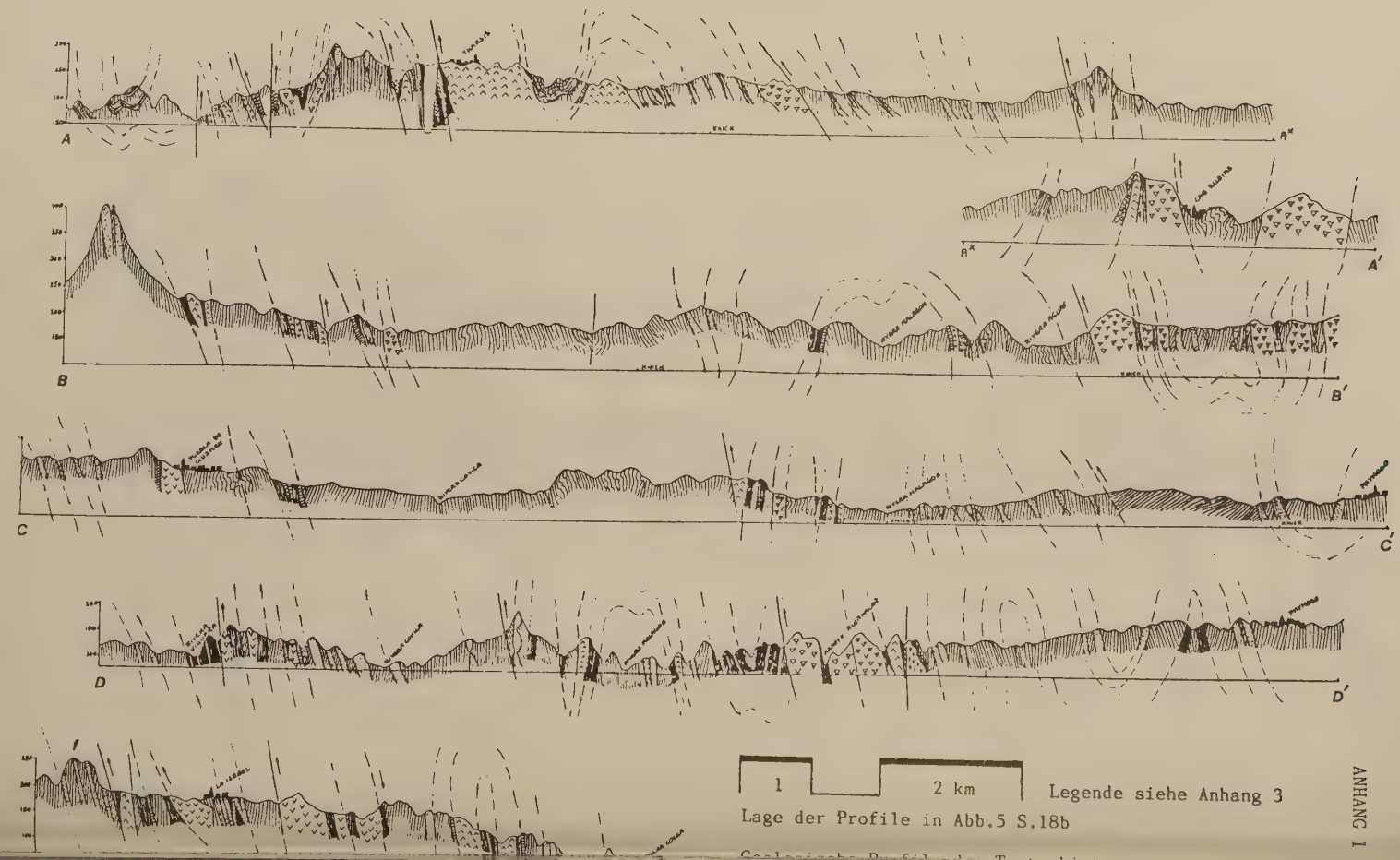
ZOBRIST A.L.,BLACKWELL R.J.,STROMBERG W.D. (1979) integration of Landsat, Seasat and other geodata sources, 13th proc.symp.RS of environm., ERIM, Ann Arbor, S.271-279

VERWENDETE KARTEN

Geologie: ---Geologische Karte der iberischen Halbinsel
1:1000000 IGME Madrid 1980
---Geologische Karten von Spanien
1:200000 IGME Madrid
Blatt 74 Puebla de Guzman 1980
Blatt 75 Sevilla 1980
---Geologische Karten von Spanien
1:50000 IGME Madrid
Blatt 936 Paymogo 1978
Blatt 937 el Cerro 1960
Blatt 958 Puebla de Guzman 1982
Blatt 959 Calanas 1982
---Geologische Detailkarten
1:5000 bis 1:10000 Ca.Tharsis S.A.
Umgebung Tharsis, Cabezas Rubias
---dto.:
1:25000 IGME Madrid
Umgebung Herrerias Informe 958/1 1976
---metallogenetische Karte
1:200000 IGME Madrid
Blatt 74 Puebla de Guzman 1972
Blatt 75 Sevilla 1972

Topographie: --Topographische Karte der Provinzen
1:200000 IGN Madrid 1977
Blatt Huelva
---Topographische Karten
1:25000 IGN Madrid 1981
Blatt 936/III Alqueria
Blatt 936/IV Paymogo
Blatt 937/III Cabezas Rubias
Blatt 958/I Parador
Blatt 958/II Puebla de Guzman
Blatt 958/III Granado
Blatt 959/I Villanueva
Blatt 959/III Alosno

Geophysik: ---Übersichtskarte der geophys. Messungen
im Pyritgürtel
1:200000 IGME Madrid 1981
---Helikopter Geophysik-Karten
Testgebiet BGR Hannover 1977
Aeromagnetik 1:12500, 1:50000
Elektromagnetik 1:12500
(Scheinb. spez. Widerstand und Tiefe)
Gamma-Spektrometrie 1:12500, 1:50000
(je Thorium, Uran und Kaliumaktivität)
---Gravimetrische Karten
Umgebung Tharsis Ca.Tharsis S.A. 1973
1:5000
---diverse gravimetrische und geoelektrische
Detailkarten der Gebiete Tharsis, Cabezas
Rubias, Puebla, Cabezas del Pasto der Ca.
Tharsis S.A., 1:5000 bis 1:10000



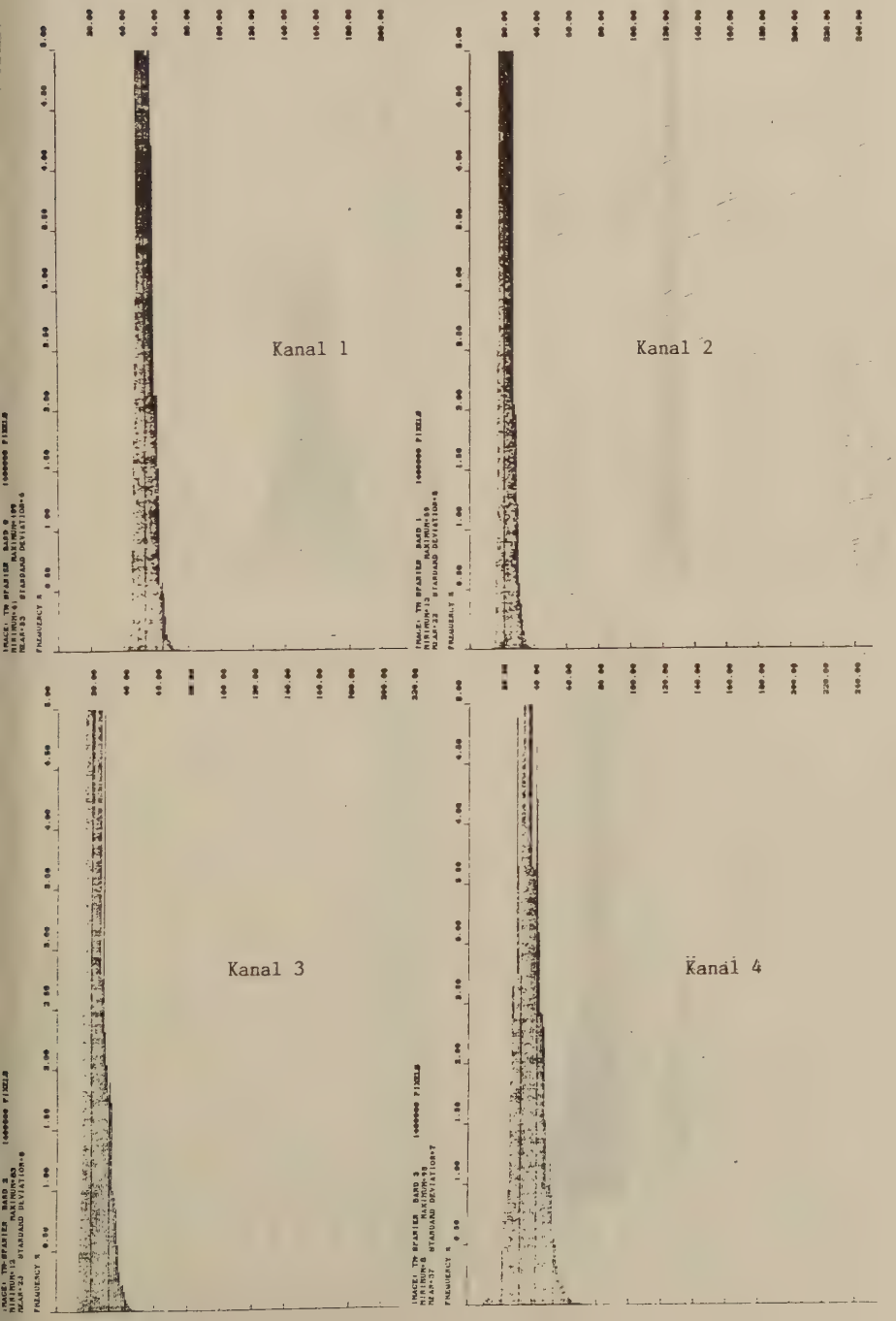
Legende siehe Anhang 3

Lage der Profile in Abb.5 S.18b

Geologische Profile der Tr...

ANHANG 1

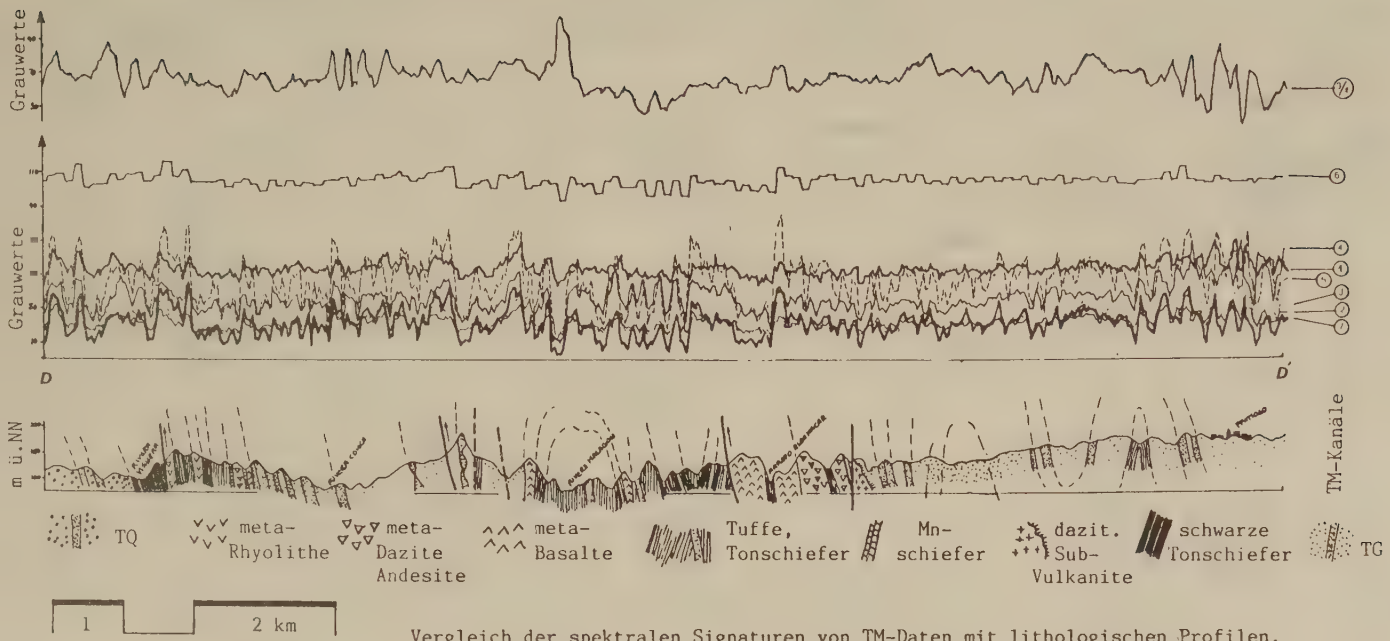
Dynamik der 7 TM-Kanäle (Originaldaten) für die Szene L4T83 26203 34F04-2



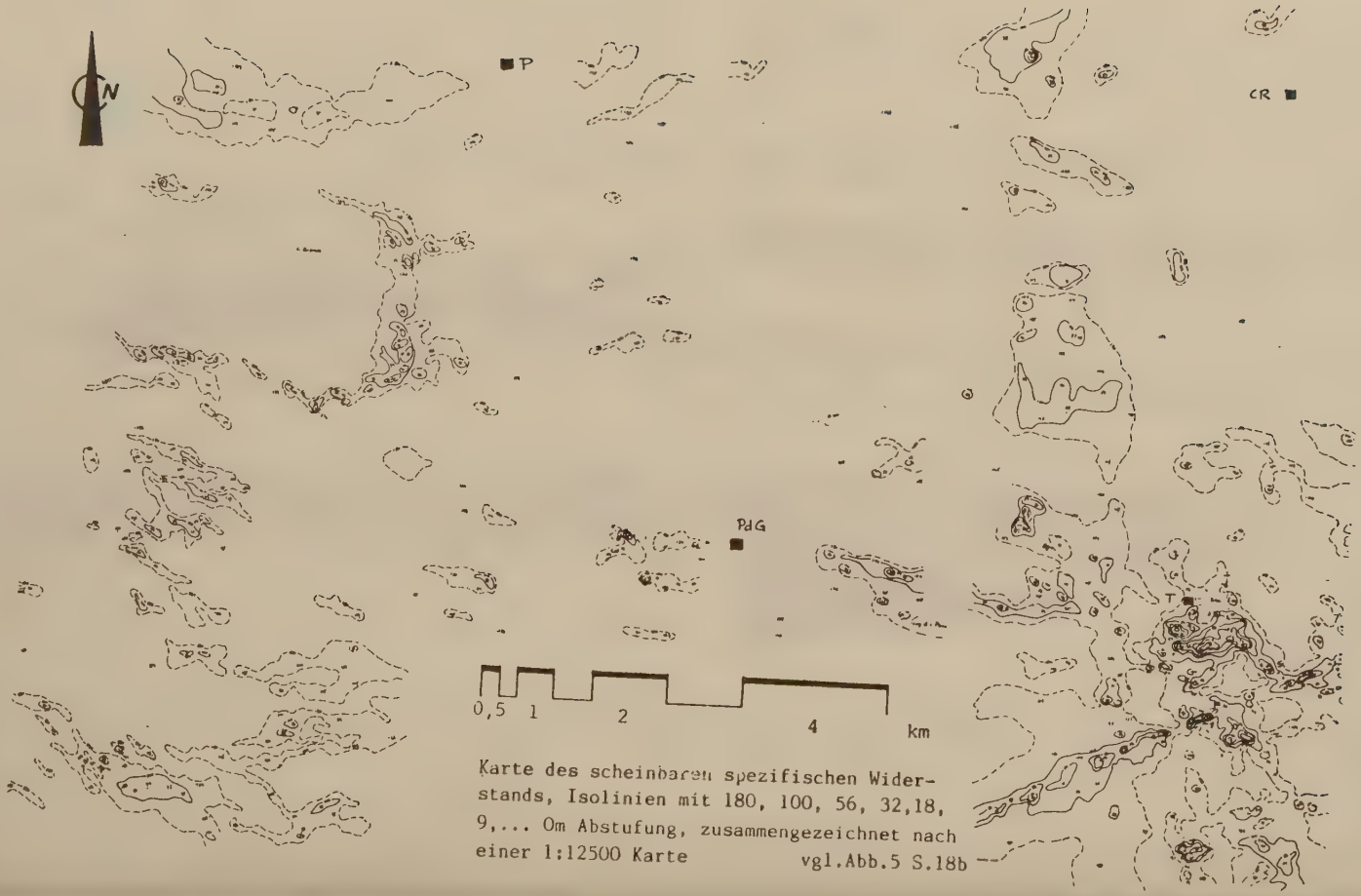
Kanal 6

Kanal 5

Kanal 7

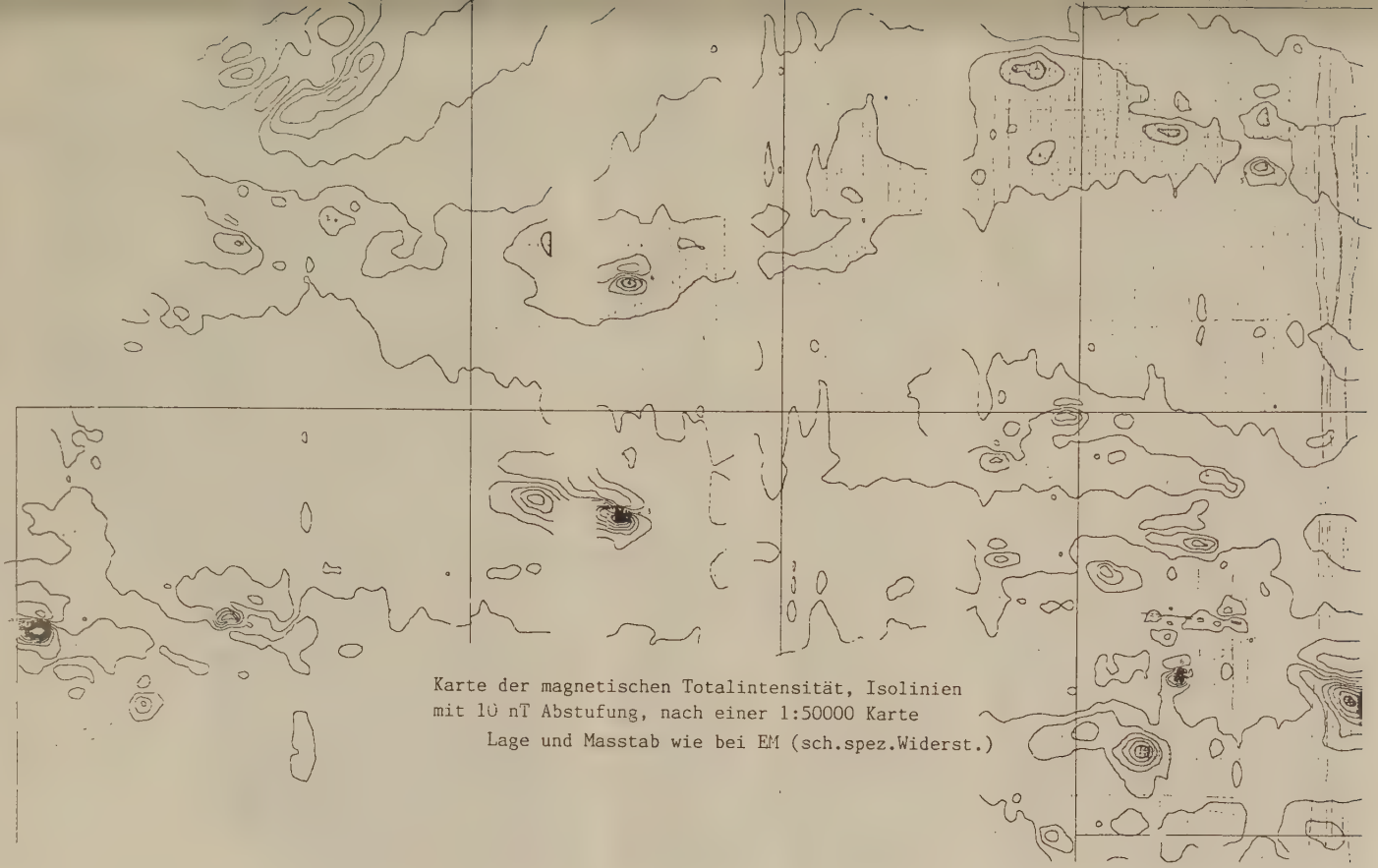


Vergleich der spektralen Signaturen von TM-Daten mit lithologischen Profilen, Lage des Profils s.Abb.5,S.19b, beachte starken Einfluss der Topographie

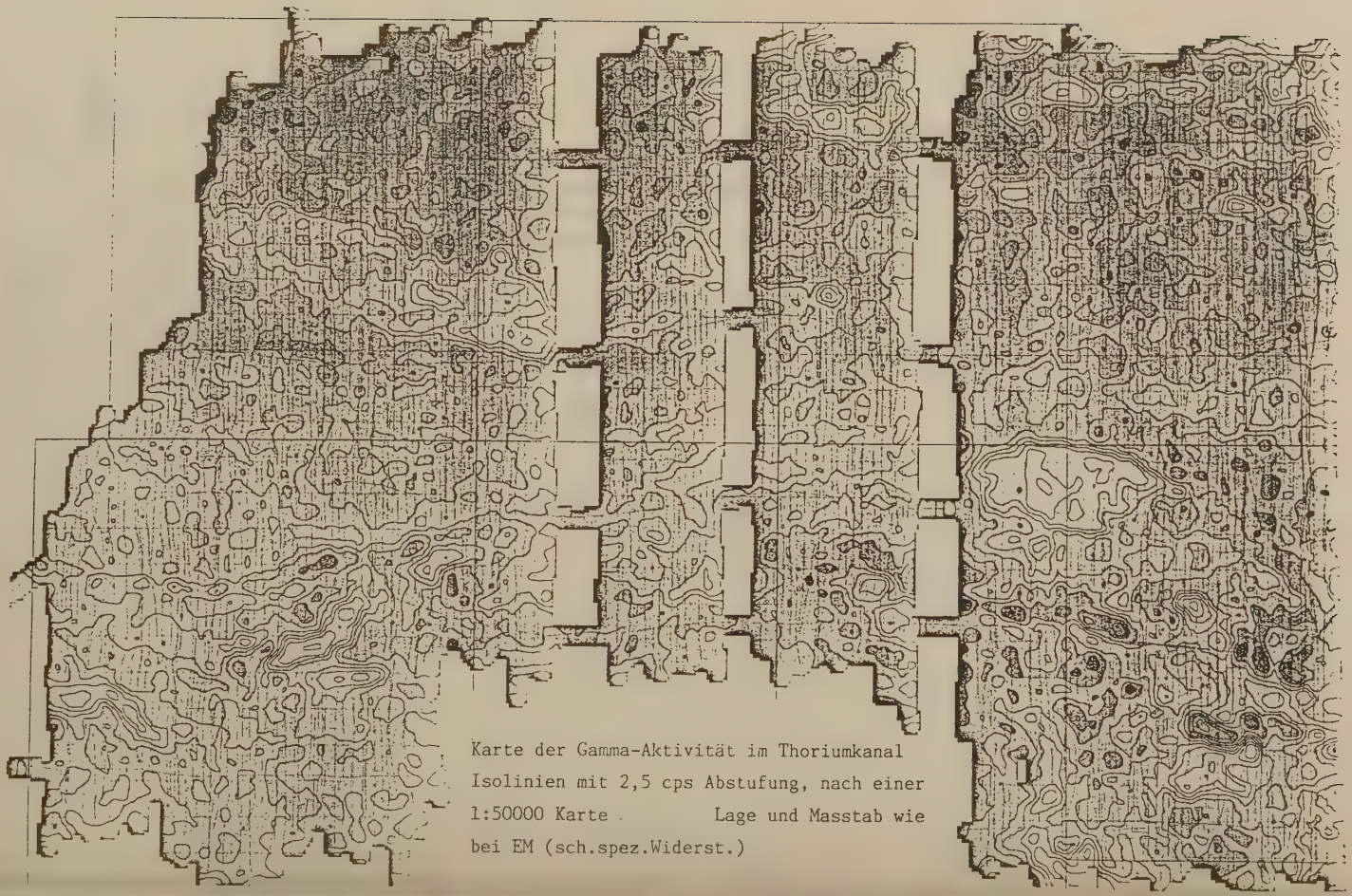


Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands, Isolinien mit 180, 100, 56, 32,18, 9,... Om Abstufung, zusammengezeichnet nach einer 1:12500 Karte

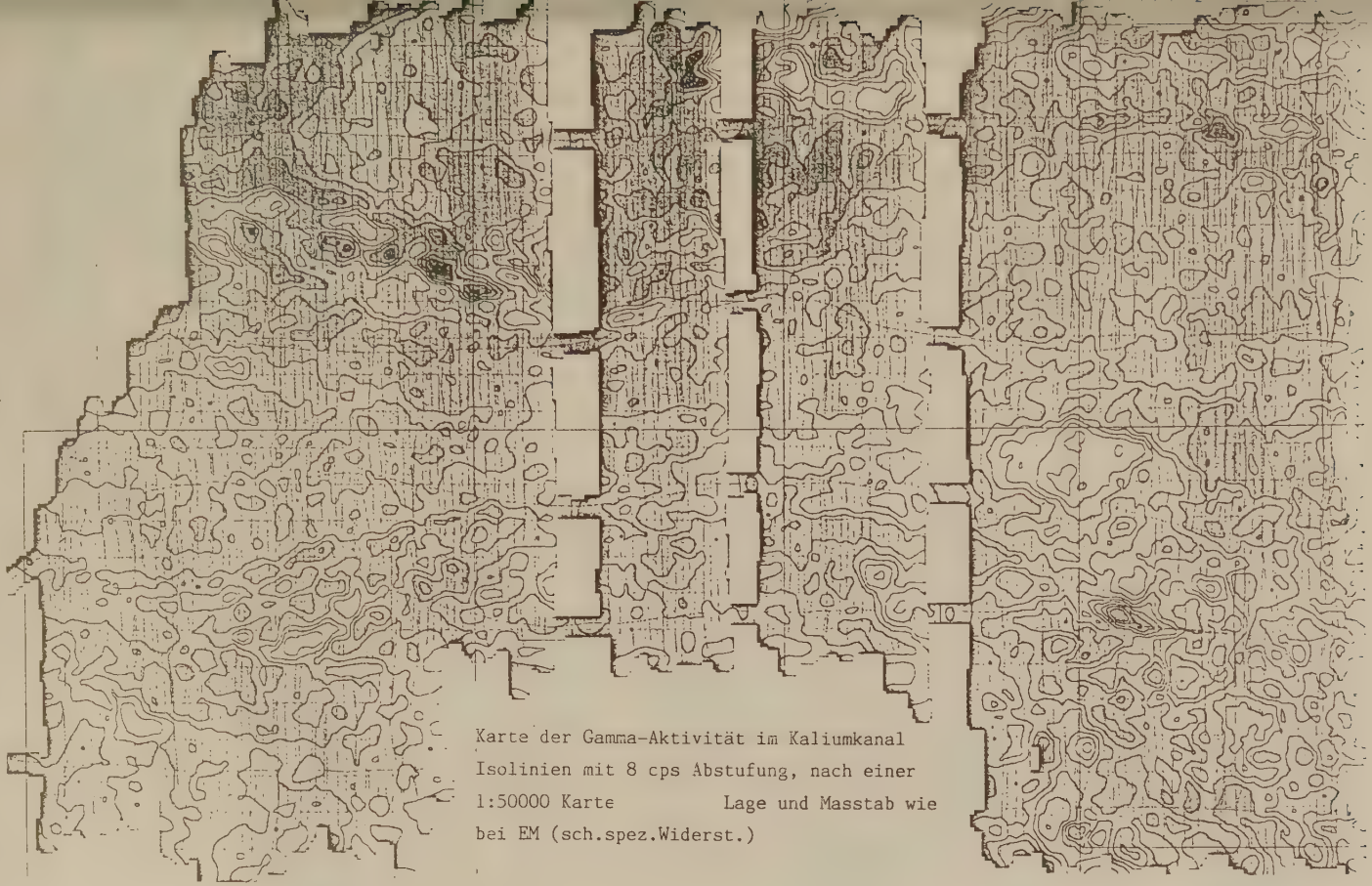
vgl.Abb.5 S.18b



Karte der magnetischen Totalintensität, Isolinien
mit 10 nT Abstufung, nach einer 1:50000 Karte
Lage und Masstab wie bei EM (sch.spez.Widerst.)



Karte der Gamma-Aktivität im Thoriumkanal
Isolinien mit 2,5 cps Abstufung, nach einer
1:50000 Karte . Lage und Masstab wie
bei EM (sch.spez.Widerst.)

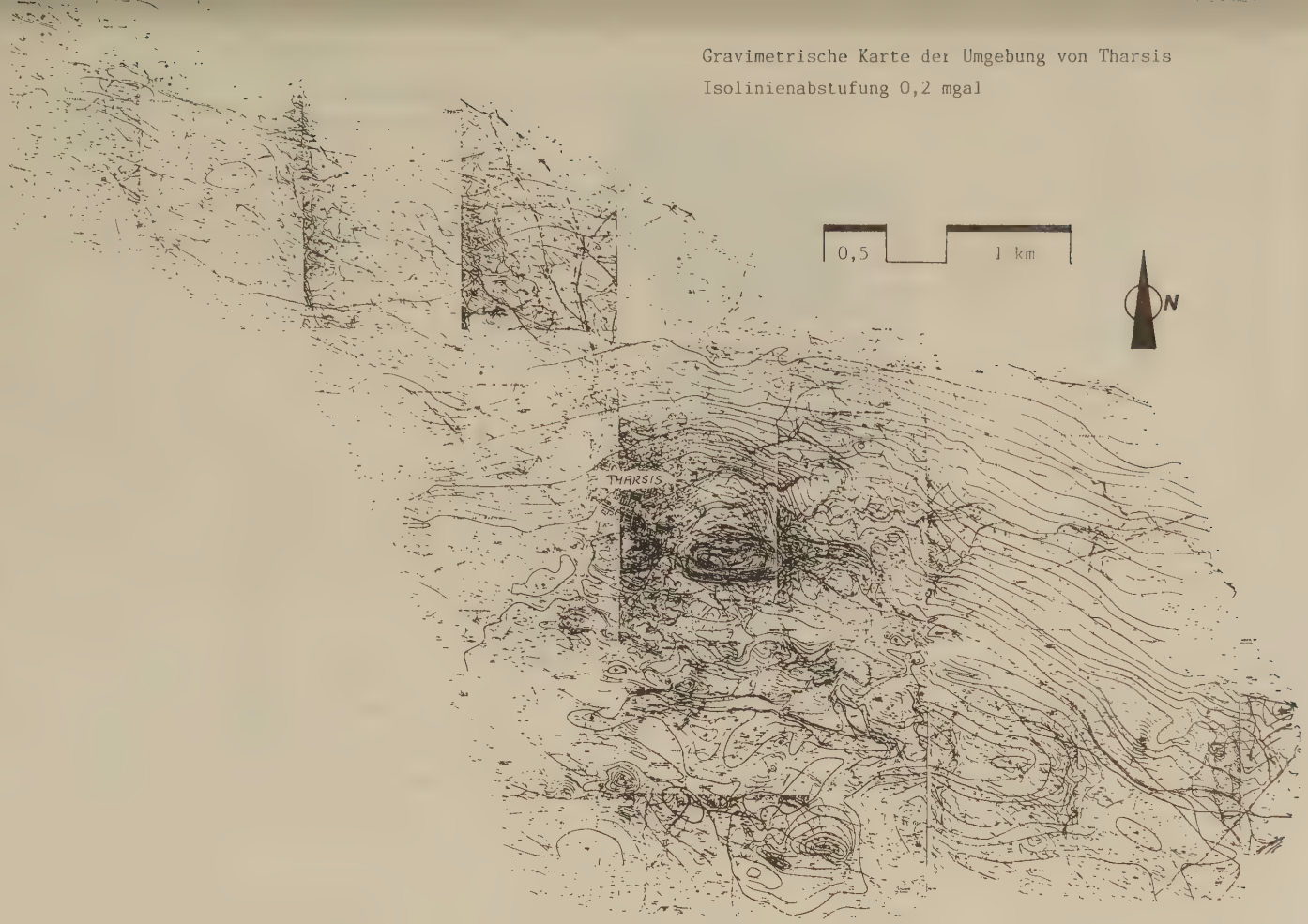


Karte der Gamma-Aktivität im Kaliumkanal
Isolinien mit 8 cps Abstufung, nach einer
1:50000 Karte Lage und Masstab wie
bei EM (sch.spez.Widerst.)

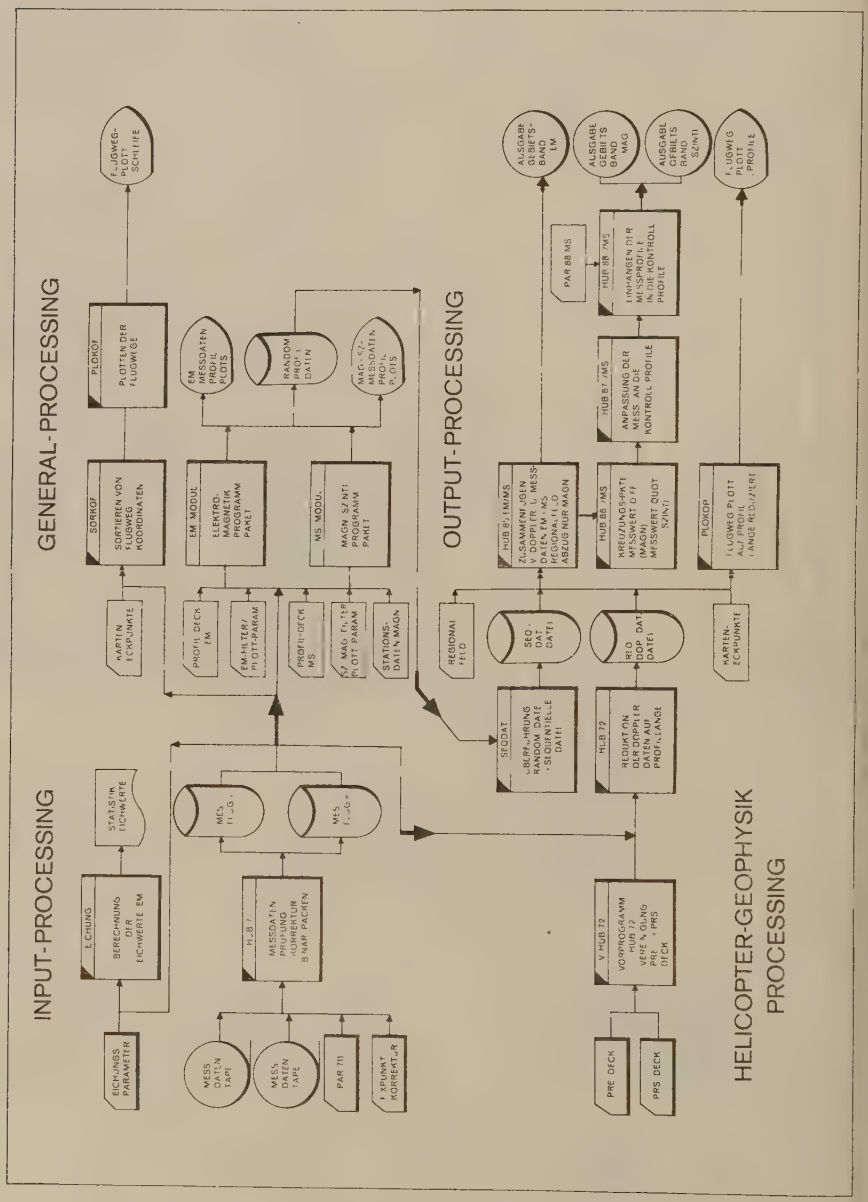
Karte eines Verhältnisses der Thorium- und Uran-Aktivität (Gamma-Spektrometrie), Th/U; Isolinien logarithmisch abgestuft, nach einer 1:50000 Karte Lage und Masstab wie bei EM (sch.spez.Widerst.)

Gravimetrische Karte der Umgebung von Tharsis

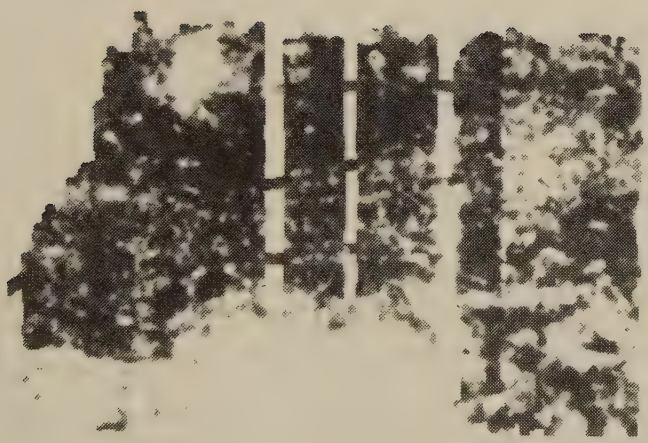
Isolinienabstufung 0,2 mgal



Prozessierung der Geophysikalischen Flugdaten nach einem Diagramm der Abteilung Geophysik der BGR, Hannover



Th/K-Ratio der gamma-spektrometrischen Daten für das Testgebiet, dargestellt als Rasterbild, kontrastverstärkt.



ANHANG 7

Prozessierungsparameter der gerechneten DS - Kombinationen
(alle DS registriert und auf 8 Bit Datenvolumen gebracht)

*1 TM5-PLAST+LBLIN.DICHTE
TM5-Plast: 120/135 auf 100/255
LB-Lindichte: 0/60 auf 0/100
Summe: 130/245 auf 0/255

*2 TM4+MAG
Int.: TM4: 20/56 auf 0/255
Parallaxe: Mag: 26/70 auf 0/255

*3 TM5+PC1+TM-DOPPELRATIO
Int.: TM5: 10/80 auf 20/255
Hue: PC1: 30/122 auf 15/230
Sätt.: TM-Doppelratio: 15/145 auf 10/255

*4 TM5-PLAST+TM-DOPPELRATIO
Int.: TM5-PLAST: 122/132 auf 0/255
Hue: TM-Doppelratio: 71/170 auf 30/240
Sätt.: TM-Doppelratio: 71/170 auf 50/255

*5 TM4+EM+MAG
Int.: TM4: 8/72 auf 0/255
Hue: EM: 255/20 auf 40/250
Sätt.: const.180
Parallaxe: Mag: 26/70 auf 0/255

*6 TM4+GAMMA-Th+GAMMA-K
Int.: TM4: 20/56 auf 0/255
Hue: Gamma-Th: 10/21 auf 25/245
Sätt.: const.180
Parallaxe: Gamma-K: 15/60 auf 0/255

*7 LUFTBILD+EM+GRAV
Int.: digital. Luftbild: 72/227 auf 0/255
Hue: EM: 10/60 auf 0/255
Sätt.: Grav: 0/60 auf 0/255

ANHANG 8

Diskussion der Qualität der sieben bearbeiteten DS-Kombinationen vom Standpunkt der Bildverarbeitung:

DS - Kombinationen:

*1 Addition von TM 5 Pseudoplast und Lineamentdichte

Die Lineamentdichte ist in ihren relativen Werten gut abzuschätzen. Die diffusen Flecken lassen sich unabhängig von der unterlagernden TM - Information in mindestens 4 Grauwertklassen einteilen (<4LpR,4-6 LpR,6-8 LpR,>8LpR). Ein Informationsverlust ist lediglich bei Werten <4 LpR (LpR = Lineamente per Rasterzelle) festzustellen, diese sind für eine thematische Interpretation jedoch ohne Belang.
Die Strukturen der TM 5 Verarbeitung sind über den gesamten Helligkeitsbereich zu erkennen und erlauben außerdem eine Orientierung durch abgebildete Höhenrücken, Flüße, Bäche und Stauseen. Positiv wirken sich die vorgenommenen Glättungen mit CONV auf die Lineamentdichte aus, vegetationsbedingte Lücken in der Lineamentauswertung werden so abgeschwächt und perlschnurartige, zusammenhängende Züge erkennbar.

*2 SST: Intensität TM 4, Parallaxe Magnetik

Unter dem Stereoskop ist sofort die bei den Helikopter - Messflügen abgedeckte Fläche samt Datenlücken zu sehen. Sie scheint über dem Satellitenbild zu schweben. Maxima und Minima sind als morphologische "Höhen" und "Tiefen" direkt zu erkennen. Auch schwache Trends, wie z.B. der nur geringfügig erhabene Rücken im gesamten Mittelteil, sind sehr gut zu verfolgen. Extremwerte wurden zu Gunsten einer erhöhten Dynamik zwischen 0 und 20 nT, ab 60 nT und unter -10 nT als absolute Maxima und Minima betrachte. Daher rührt ein gewisser "Plateaueffekt". Da es sich aber nur um wenige Stellen handelt und ihre Natur deutlich zu erkennen ist, scheint er bei der Interpretierbarkeit nicht zu stören. Die auf den vollen Dynamikumfang gebrachten Bilddaten des TM 4 liefern einen ausgezeichneten Überblick über geographische Phänomene des Testgebiets. Durch den niedrigen Sonnenstand entsteht ein Pseudorelief, daß aber eine ausgezeichnete Orientierungsgrundlage bietet zusammen mit einiger geologischer Basisinformation.

*3 IHS: Intensität TM 5, Hue PC 1, Sättigung TM Doppelratio

TM 5 zeigt als Intensität im wesentlichen orientierende und strukturelle Information, ähnlich TM 4. Die 1. Hauptachse (PC 1) kontrolliert die Farbfrequenz erkennbar nur zwischen rot und grün. Dies liegt zum größten Teil daran, daß Blauanteile (niedrige Grauwerte) mit Flächen

zusammenfallen, die auch in der Intensität mit den niedrigsten Werten besetzt sind (Schatten). Dieser Effekt ließ sich nicht weiter minimieren ohne strukturelle Information zu verlieren. Die Sättigung zeichnet leider kaum differenzierte Informationen des Doppelratios nach, sogar extrem niedere Werte sind nur schwierig als besonders gesättigt zu erkennen. Schwächere Grundsättigung aller anderen Flächen läßt diese dann kaum in Farbfrequenz und Intensität unterscheiden. Insgesamt gesehen erscheint dieses Produkt problematisch für eine Interpretationsoptimierung, da Vegetation, Schatten die geologisch relevante Information unterdrücken.

*4 IHS: Intensität TM 5 Pseudoplast, Hue+Sättigung TM Doppelratio
Dieses Produkt vereinigt strukturelle mit lithologischer Information via IHS. Die TM Doppelratio Werte kontrollieren zugleich Farbfrequenz und Sättigung, beide invers korreliert. So zeigen geringe Werte rote, kräftige und hohe Werte blaue, schwach gesättigte Farben. Als Intensität wurde eine TM Strukturverarbeitung gewählt, um die Orientierung zu erleichtern, strukturelle Trends zu verdeutlichen und die Doppelratio - Informationen nicht zu beeinflussen. Für eine Interpretation scheint, was die bildverarbeiterische Qualität anbetrifft, dieses Produkt gut geeignet zu sein. Die integrierten Informationen sind weder verwirrend noch vieldeutig dargestellt.

*5 IHS-SST: Int.TM 4,Hue Gamma-Th,Sätt. konst.,Parallaxe Gamma-K
Der Intensitäts - DS (TM 4) läßt alle wichtigen Strukturen und morphologischen Landmarken, zusammen mit geologischer Basisinformation gut erkennen, stört aber nicht bei der Beurteilung der Farbe. Die lithologisch bedeutsamen Gamma-Th Werte beeinflussen die Farbfrequenz so, daß blaue Farben Flächen <10 cps und rote solche mit >20 cps dokumentieren. Diese Einteilung löst die Testfläche in ein kontinuierliches Muster an spektralen Farben zwischen den Endgliedern rot und blau auf. Die eingerechnete Parallaxen - Information zeigt Gamma-K Variationen, Werte <5 cps entsprechen absoluten Minima (Parallaxe 0) und >40 cps absoluten Maxima (größte Parallaxe). Dieses Produkt erscheint von seiner technischen Durchführung nahe einer optimalen Erfüllung der konzeptionellen Anforderungen. Besonders positiv zu bewerten ist, daß die Flächen ohne interpolierte spektrometrische Daten sowohl in der Farbe als auch im Höheneindruck sehr gut von denen mit Daten auszuhalten sind, ohne den Zusammenhang mit den die Gesamtfläche abdeckenden TM - Daten zu verlieren.

*6 IHS-SST: Int.TM 4,Hue EM,Sättigung konst.,Parallaxe Magnetik
Die bildverarbeiterische Lösung für dieses Konzept ähnelt dem von *5, wobei ebenfalls TM 4 Daten dieselbe Aufgabe übernehmen (Intensitäts - DS). Die Werte des scheinbaren spezifischen Widerstands der EM - Messungen modulieren die Farbfrequenz, die Zuordnung der Farben wurde wie folgt festgelegt: rot <20 Ωm, gelb 20-50 Ωm, grün 50-100 Ωm, blau >100 Ωm. Die Magnetik kontrolliert die Parallaxen des SST, wobei dieselben Grenzwerte und qualitativen Eigenschaften wie bei *2 gelten. Die Begrenzung der zur Verfügung stehenden EM - Daten ist nicht mit dem blauen Feld identisch. Dieser DS mußte über eine Kartendigitalisierung erzeugt werden und aus der Kartenqualität war eine exakte Begrenzung des Messgebietes nicht möglich. Daher gilt, daß die farbliche Kodierung nur in den durch die magnetischen Werte beeinflussten Flächen (erhabene Flächen) zuverlässig Lage, Ausdehnung und Werte der EM - Anomalien wiedergibt. Diese Divergenz zwischen EM und Magnetik ist für eine Interpretation als ungünstig zu werten. Insgesamt aber ist das Ergebnis gemessen an den Erwartungen als gut einzuschätzen.

*7 IHS: Intensität Luftbild, Hue EM, Sättigung Gravimetrie
Um die Farbfrequenz ausreichend hervorzuheben, wurde die Information des digitalisierten Luftbildes wie als Photo - Negativ benutzt und dazu noch aufgehellt. Dadurch ist zwar nach wie vor die Orientierung im Gelände möglich, aber eine Abdunkelung schwach gesättigter Farbfrequenzen wurde verhindert. Die Farbkodierung wurde analog zu den Abstufungen in *6 gewählt. Die Kontrolle der Sättigungskomponente durch die Gravimetrie erwies sich bei mehreren Versuchen problematisch. Einmal mußte auf die geringen Dichtekontraste von Sedimenten zu Vulkaniten eingegangen werden, wobei die Unterschiede der VK - Serien zu Erzkörpern undeutlich werden, andererseits erlaubt eine Differenzierung in Wertebereichen zwischen 84 und 92 mgal (Kontrastdynamik Erz/VK) kaum visuelle Trennung bei geringerer Schwerebeschleunigung. Ein Kompromiss zeigt bedeutende Phänomene in beiden thematisch interessanten Wertebereichen. Es stellte sich davei heraus, daß ein DS, der die Sättigung kontrolliert, lediglich zwei "Informationsplateaus" besitzen darf, um noch differenzierbar darstellbar zu sein. Weisen sowohl Intensitäts - DS als auch Farbfrequenz - DS eine starke Dynamik auf, sind nur noch stark und schwach gesättigte Farben zu unterscheiden. Bei Flächen ohne gravimetrische Daten (unten links, wenig oben rechts), wurde trotzdem eine Grundsättigung berücksichtigt, um die Hue - Information nicht verloren gehen zu lassen.

Lebensdaten

1955	Geburt in Neckarsulm als erster Sohn des Ingenieurs Paul Volk und seiner Frau Doris
1961	Eintritt in die St. Josefs Volksschule, Ingolstadt
1965	Übertritt in das naturwissenschaftliche Erasmus-Grasser-Gymnasium, München
1975	Abitur
1975	Wehrdienst
1976	Beginn des Diplomstudiums Geol. / Paläontologie an der Ludwigs-Maximilians-Universität
1978	Vordiplomsprüfung
1981	Hauptdiplomprüfung
1982	Fertigstellung der Diplomarbeit Schwerpunkt Tektonik
1982	freie Mitarbeit an verschiedenen Projekten in angewandter Fernerkundung
1983	Beginn der Dissertation
1983	wissenschaftlicher Mitarbeiter am BMFT-Projekt "Anwendung eines modifizierten geographischen Informationssystem zur lagerstättenkundlichen und hydrogeologischen Nutzung von Fernerkundungsdaten in Zusammenhang mit thematischen Karten."

VERZEICHNIS DER MIT "BILD" GEKENNZEICHNETEN FARBABBILDUNGEN

Achtung: Die aufgedruckten Nummern korrespondieren leider nicht mit den im Text dieser Arbeit angeführten! Zur Auffindung der richtigen Abbildung sei hier die Referenznummer angegeben:

BILD 1	TM5PLAST+LINDICHTE	zeigt Nr. 2
BILDER 2,3	TM4+MAG 2=rechts 3=links	zeigen Nr. 3,4
BILD 4	TM5+TM-PC1+TM-DOPPELRATIO	zeigt Nr. 17
BILD 5	TM5PLAST+TM-DOPPELRATIO	zeigt Nr. 12
BILDER 6,7	TM4+Th+K 6=rechts 7=links	zeigen Nr. 13,14
BILDER 8,9	TM4+EM+MAG 8=rechts 9=links	zeigen Nr. 15,16
Abb. 53	LUFTBILD+EM+GRAV 11=IHS 10=RGB	zeigen Nr. 10,11

(vergleiche auch Text auf Seite 105, nur 11=IHS wurde interpret.)

BILDER 2,3 6,7 und 8,9 sind Stereodarstellungen, die niedrige Nummer steht für das rechte, die höhere für das linke Bild. Beim Betrachten durch ein Spiegelstereoskop ist eine kurze Eingewöhnungszeit zu berücksichtigen.
Zu Lage und Masstab vergleiche die jeweiligen Interpretationen in Kapitel V, Ergebnisse.

3
2
17